جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

تأثير حدالسيولة وحد اللدونة والفعّالية والفعّالية المعدّلة في الأتربة الناعمة على قرينة الإنضغاط و معامل التشوه الخطي المستخرجين من تجربة الآدومتر

أعدت هذه الرسالة لنيل شهادة الماجستير في الهندسة المدنية قسم الهندسة الجيوتكنيكية

إعداد: المهندسة مها الخضور

الأستاذ المشرف:
أ. د. م. حنـا يـنـيَ

المشرف المشارك:
د. م. طلال عوّاد

العام الدراسي ٢٠٠٩ ـ ٢٠١٠

الفهرس

الفقرة **الصفحة**

كلمة شكر و إهداء

إلى من تتوارى كلمات الشكر خجلاً من فيض علمهم .... و واسع خبرتهم ....
إلى من ستبقى ذاكرتي دوماً زاخرة بأيديهم التي خطت طريق مستقبلي ...

أ.د.م حنّـا ينّـي الذي تكرم بالإشراف على هذا العمل و منحه الرعاية و الاهتمام و الدعم و كان لتوجيهاته الدور الأهم في إنجازه.

د.م. طلال عواد الذي شارك مشكورا بالإشراف على هذا العمل وأغناه بنصائحه وتوجيهاته القيمة .

أ.د. غسان صنوبر الذي لم يبخل علي بوقته الثمين و بنصائحه القيّمة و بتوجيهاته التي أغنت البحث.

أ.د.م مروان حمزة و أ.د.م أدهم سرحان اللذان شرفاني بقبولهما المشاركة في لجنة التحكيم

د.م. محمد غياث مارديني (قدوتي و منارة دربي , اليد الحانية و القلب الدافئ ... زوجي الغالي) الذي سهر الليالي بجانبي حتى تم إنجاز هذا العمل.

وأخيرا لابد لي من توجيه كلمة شكر للبروفسور إيفو هيرليه من جامعة درسدن في ألمانيا وطاقم العمل في المخبر على إهتمامهم ونصائحهم وتوجيهاتهم القيمة التي ساعدتني ليرى هذا العمل النور..

جدول الرموز

A	Activity	الفعّالية
A_m	Modified activity	الفعّالية المعدّلة
a_v	Coefficient of compressibility	معامل الإنضغاط
C_c	Compression index	قرينة الإنضغاط
Cl	Clay friction	نسبة الغضار
C_s	Swelling index	قرينة الانتفاخ
C_v	Coefficient of consolidation	معامل الإنضغاط الرشحي
e_0	Initial void ratio	معامل المسامية الإبتدائي
E_0 , E	Elasticity modulus	معامل المرونة
E_{PLT}	Plate-loading modulus	معامل التشوه من تجربة تحميل الصفيحة
E_s (E_{oed})	Oedometer modulus	معامل التشوه الآدومتري
G_s	Particle Specific gravity	الوزن النوعي النسبي
I_P	Plasticity index	قرينة اللدونة
K_0	Coefficient of earth pressure at rest	معامل ضغط التربة الجانبي في حالة الراحة
k	Coefficient of permeability	معامل النفاذية
m_v	Volumetric compressibility coefficient	معامل الإنضغاط الحجمي (النسبي)
n_0	Initial porosity	المسامية الإبتدائية
R^2	Correlation coefficient	معامل الارتباط
OCR	Over- consolidation ratio	درجة الإجهاد المسبق
t_{90}	Time required to complete 90 percent primary consolidation	الزمن اللازم لإنضغاطية بمقدار ٩٠%
t_{100}	Time required to complete 100 percent primary consolidation	الزمن اللازم لإنضغاطية بمقدار ١٠٠%
w	Water content	الرطوبة
w_0	Initial water content	الرطوبة الإبتدائية
w_L	Liquid limit	حد السيولة
w_n	Natural water content	الرطوبة الطبيعية
w_P	Plastic limit	حد اللدونة
U %	Degree of consolidation	درجة الإنضغاطية
σ'	Effective stress	الضغط (الإجهاد) الفعال
ε	Strain	التشوهات النسبية
γ_d	Dry unit weight	الوزن الحجمي الجاف
ν	Poisson's ratio	معامل التوسع الجانبي (معامل بواسون)

خلاصة

يعالج هذا البحث تأثير خواص الأتربة الناعمة خاصة حد السيولة و حد اللدونة و الفعّالية و الفعّالية المعدلة على قرينة الإنضغاط و معامل التشوه الخطي (الأدومتري).

يشمل البحث قسمين رئيسين , القسم الأول هو الدراسة النظرية و التي شملت دراسة مجموعة كبيرة من المراجع والأبحاث و الدراسات المتعلقة بموضوع البحث الإنضغاطية في الأتربة الناعمة و العوامل المؤثرة عليها (بشكل عام) والعلاقات التجريبية المقترحة لتقدير قرينة الإنضغاط و معامل التشوه الخطي (بشكل خاص), و قد وُجدت أكثر من ١٠٠ علاقة تجريبية (مقترحة) معمول بها لحساب قرينة الإنضغاط , حيث كانت هذه العلاقات مختلفة بشكل ملحوظ عن بعضها البعض بشكلها وبالقيم الناتجة عنها وبدقتها وبالمتحولات الداخلة فيها. تمت دراسة هذه العلاقات بشكل مفصل ودقيق , حيث وُجد أن التباين بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من هذه العلاقات كذلك المتماثلة منها من حيث شروط التطبيق , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات أخرى غير نوع التربة أو درجة تخرب العينة فقط, وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لمتحول واحد فقط أو أكثر من المتحولات المذكورة في المراجع المختلفة (مثل معامل المسامية الإبتدائي أو حد السيولة أو قرينة اللدونة) هو أمر غير مرض و غير كاف.

شمل القسم الثاني من البحث الدراسة التجريبية , حيث تم اختيار أربعة أتربة ناعمة مختلفة الخواص , أُجريت عليها تجارب تعيين الخواص الأساسية و تجارب الإنضغاطية, و من ثم تمت معالجة النتائج وتقييمها, حيث قورنت هذه النتائج مع النتائج التجريبية للدراسات و الأبحاث السابقة و تم الحصول على علاقات تجريبية جديدة لحساب قرينة الإنضغاط ومعامل التشوه الخطي , وذلك من خلال دراسة و إستخدام بعض الخواص (المتحولات) الجديدة و التي لم يتم دراستها و استخدامها سابقا في هذا الموضوع كنسبة المواد الناعمة , الفعّالية, والفعّالية المعدّلة.

أي تم في النهاية إيجاد علاقات تجريبية جديدة ذات دقة إحصائية عالية تمكننا من حساب قرينة الإنضغاط و معامل التشوه الخطي من خلال إجراء بعض التجارب الأساسية البسيطة بالمقارنة مع تجربة الإنضغاطية.

الفصل الأول

مدخل



١- مدخل

إن تأسيس أي منشأة هندسية أو بناء بشكل سليم وآمن وإقتصادي يتطلب معطيات عن القاعدة الترابية أو الصخرية التي ستستند عليها أساساته, وهذه المعطيات تشمل معطيات الخواص و المواصفات الفيزيائية, الخواص والمواصفات الميكانيكية ,الخواص والمواصفات الكيميائية , إضافة إلى علاقة التربة بالماء عند وجوده... إلخ , و تلزم هذه المواصفات من أجل تقييم متانة التربة و هبوطها, بحيث يتحقق شرطا المتانة و التشوه في تأسيس البناء المزمع إقامته.
يتبين من خلال الحالات التاريخية للتصدعات في الأبنية أن الهبوط و فرق الهبوط كانا السبب الرئيسي في حدوث التصدعات و بالتالي فمسألة تقييم الهبوط و طرق حساب القرائن و المواصفات المستخدمة في حساباته تلعب دورا رئيساً في تحديد دقة القيم الناتجة في الحساب و التي يمكن أن تطابق الواقع أو أن تكون قريبة منه أو بعيدة عنه و بالتالي سيتطرق البحث لموضوع حساب الهبوط و حساب قرائنه , خاصة موضوع حساب الإنضغاطية في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء في جهاز الآدومتر , حيث أنه و منذ أن أصدر العالم كارل ترزاكي نظريته في دراسة الإنضغاطية في جهاز الآدومتر عام ١٩٢٥ و حتى الوقت الحاضر يبقى هذا الاختيار , المصدر الرئيسي لتعيين الثوابت الداخلة في حساب الهبوط (الإنضغاطية).

هناك عدة طرق لحساب الهبوط بشكل عام , منها الطرق الرياضية (التحليلية) المعتمدة على نظرية المرونة وخاصة في الأتربة الخشنة , ومنها مايعتمد على نتائج التجارب الحقلية أو المخبرية وخاصة الهبوط الناتج عن الإنضغاطية في الأتربة الناعمة و منها ما يعتمد على علاقات تجريبية ذات دقة إحصائية معينة تربط بين بعض خواص التربة مثل معامل المسامية والرطوبة وحدود أتربرغ وبعض القرائن والمعاملات الضرورية في حساب الهبوط مثل قرينة الإنضغاط ومعامل التشوه /٢/, /٣/, /١٠/, /١٨/ .

في السنوات الماضية قطعت أشواط كبيرة وملموسة في موضوع حساب الهبوطات في الأتربة وخاصة الهبوطات الناتجة عن الإنضغاطية في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء , سواء في الأسس النظرية أو في تطبيقاتها العملية, حيث ظهرت علاقات تجريبية جديدة واقترحت عدة نماذج و موديلات نظرية مناسبة لحل بعض المشكلات العملية. وإنطلاقا من أن تجارب الإنضغاطية تبقى بشكل عام مكلفة إقتصادياً و زمنياً من حيث الحاجة إلى عينات خاصة و تقنيات و أنظمة معينة للتجربة بالإضافة للحاجة إلى الدقة العالية بالمقارنة مع تجارب إستخراج الخواص الأساسية للتربة الأكثر إقتصادية كلفة وزمنا والأسهل تنفيذيا مثل التركيب الحبي وحدود آتربرغ وغيرها لجأ العلماء و الباحثون بإستمرار إلى إيجاد وتطوير علاقات تجريبية جديدة تربط بين بعض القرائن أوالمعاملات الناتجة من تجربة الإنضغاطية مثل قرينة الإنضغاط ومعامل التشوه وبعض الخواص الأساسية للتربة /2/, /3/, /11/, /18/ وذلك لإستخدامها في حساب وتقدير الهبوطات أو الإنضغاطية في طبقات التربة بدقة معينة كافية , دون الحاجة إلى الخوض في تجارب الإنضغاطية المكلفة إقتصاديا وزمنيا وتقنيا.

من خلال دراسة واسعة ودقيقة للعلاقات المقترحة لحساب قرينة الإنضغاط ومعامل التشوه لأكثر من ٤٠ مرجع والتي سيرد ذكرها لاحقا في مجرى هذا البحث وجد أن:

- هناك أكثر من **١٠٠ علاقة** لحساب قرينة الإنضغاط بدقات مختلفة, منذ عام ١٩٤٤ على يد العالم سكيمبتون وحتى اليوم.
- هذه العلاقات تعتمد بشكل أساسي على الخواص الأساسية للتربة مثل حدود آتربرغ , الوزن النوعي , الرطوبة الطبيعية , معامل المسامية الابتدائي , الكثافة الجافة الابتدائية وغيرها, لتقدير قرينة الإنضغاط.
- في أغلب المراجع لم ينوه إلى أو يجرى أي تصحيح للأخطاء الممكنة والمتعلقة بالعينات وبالتجربة مثل تخرب العينات ,الجهاز المستخدم و طريقة تنفيذ التجربة ... الخ, والتي يمكن أن تكون ذات تأثير مهم على نتائج الدراسة الناتجة.
- اعتمد الكثير من الباحثين في دراستهم على نتائج تجارب سابقة دون بيان أو شرح واضح أو مفصل لنوع ولمواصفات الأتربة المستخدمة وللتجربة وللجهاز المستخدم.
- هناك نقص واضح في المعلومات اللازمة في كثير من الأبحاث مثل التركيب الحبي التربة ومواصفاتها , درجة تخرب العينات وغيرذلك, وكذلك في دقة العلاقات المذكورة.
- العلاقات المقترحة تختلف بشكل كبير وملحوظ عن بعضها البعض.

وبما أن هذه العلاقات التجريبية يمكن أن تستخدم للتقدير (الحساب) السريع للهبوط في طبقات التربة الناتج عن الإنضغاطية دون الحاجة إلى الخوض في التجارب المكلفة, لذلك كان تطوير علاقات مناسبة ذات دقة إحصائية كافية ومقبولة لتقدير قرينة الإنضغاط ومعامل التشوه كتابع لخواص و معاملات التربة أمراً مهما دائما /3/.

مما سبق يمكن أن نلخص هدف البحث بمايلي:

- القيام بدراسة نظرية للعلاقات المقترحة والمستخدمة في المراجع المختلفة في موضوع البحث وبيان أوجه وأسباب الإختلاف بينها.

- دراسة وإقتراح معاملات (متحولات) أخرى ناتجة من الخواص الأساسية يمكن أن تُعبّر بشكل أفضل عن العلاقة بين قرينة الإنضغاط أو معامل التشوه والخواص الأساسية للتربة. حيث اقترح إستخدام الفعّالية المعدّلة كما سيرد لاحقا في مجرى هذا العمل لتعبر عن هذه العلاقة , وذلك لأنها تحوي في حدودها بالإضافة إلى قرينة اللدونة نسبة المواد الناعمة (السيلت والغضار) وبالتالي تعبر عن التركيب المنرالي أيضا.

- إيجاد علاقات تجريبية ذات دقة إحصائية مقبولة تربط بين قرينة الإنضغاط وكذلك معامل التشوه الخطي في التربة والخواص الأساسية للتربة الممثلة بحدود آتربرغ والفعّالية والفعّالية المعدّلة في المقام الأول, وذلك عن طريق إجراء تجارب الإنضغاطية على بعض الأتربة الناعمة المختلفة الخواص في جهاز الآدومتر.

- مقارنة بين العلاقات الناتجة في البحث والعلاقات المقترحة والمعمول بها في المراجع المختلفة وبيان أوجه التشابه و الإختلاف بينها.

يقدم البحث ضمن خمسة فصول:

- تم طرح المشكلة المراد بحثها وبيان الهدف من البحث في الفصل الأول .
- في الفصل الثاني , وردت الدراسة النظرية , والتي تعطينا معلومات عن تجربة الإنضغاطية و العوامل المؤثرة عليها و الأخطاء الممكن حدوثها أثناء القيام بالتجربة, وعن نتائج دراسة العلاقات المعمول بها في المراجع والأبحاث السابقة , والتي تمكنّنا من حساب قرينة الإنضغاط كتابع لبعض الخواص الأساسية في التربة وبيان أوجه وأسباب الإختلاف فيما بينها.
- وُضّح في الفصل الثالث كيفية اختيار الأتربة و التجارب المجراة عليها وهي تجارب تعيين الخواص الأساسية و تجارب الإنضغاطية و نتائجها .
- يتألف الفصل الرابع من قسمين , ففي القسم الأول قورنت نتائج تجارب الإنضغاطية مع نتائج العلاقات المعمول بها في المراجع والأبحاث المختلفة , و تمت دراسة تأثير كل عامل من العوامل المقترحة في المراجع مثل الرطوبة الإبتدائية و معامل المسامية الإبتدائي و حد السيولة و قرينة اللدونة على قرينة الإنضغاط , بالإضافة إلى إقتراح معاملات أخرى ناتجة من الخواص الأساسية يمكن أن تُعبّر بشكل أفضل عن العلاقة بين قرينة الإنضغاط أو معامل التشوه والخواص الأساسية للتربة حيث اقترح إستخدام الفعّالية المعدّلة لتعبر عن هذه العلاقة, في القسم الثاني من هذا الفصل دُرس تأثير كل من قرينة الإنضغاط و معامل المسامية الإبتدائي و الفعّالية المعدّلة على معامل التشوه الخطي.
- ترد نتائج البحث و التوصيات المستنبطة في الفصل الخامس .

الفصل الثاني

الدراسة النظرية



٢- الدراسة النظرية

من أهم التشوهات التي تحدث في التربة تحت تأثير الحمولات الخارجية هو الهبوط وخاصة الناتج عن الإنضغاطية في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء والذي يمثل الإنتقال (التشوه) الشاقولي للتربة نحو الأسفل نتيجة تغير الإجهادات فيها (الحمولات), و من أهم تطبيقاته هو حساب الهبوط تحت المنشآت الهندسية المختلفة.

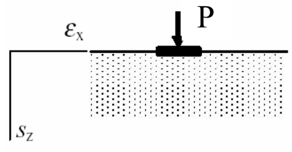
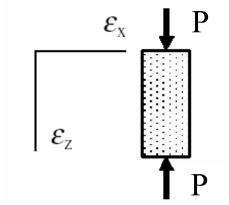
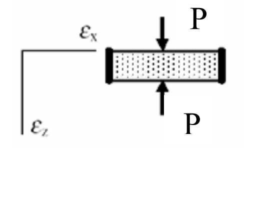
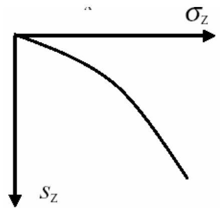
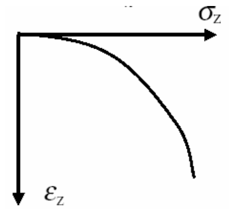
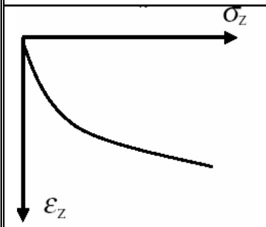
٢-١ أسباب حدوث الهبوط

هناك أسباب كثيرة لحدوث الهبوط من أهمها /46/,/10/ :

١. إنضغاط القاعدة الترابية نتيجة الحمولات الستاتيكية .
٢. انزياح القاعدة الترابية من جوانب الأساس نتيجة انهيار التربة.
٣. التأثيرات الديناميكية (مواصلات , ماكينات , تفجير, زلازل, إلخ) وخصوصاً في الأتربة الخشنة.
٤. الحركة الأفقية للمنشآت مثل دعامات قطوع الحفريات.
٥. جفاف التربة , انكماش الأتربة المترابطة.
٦. تخفيض (أوإنخفاض) المياه الجوفية .
٧. تأثير ذوبان الصقيع .
٨. انهيار في التكهفات و الفراغات في حال وجودها في توضعات التربة الأرضية.

٢-٢ حساب الهبوط

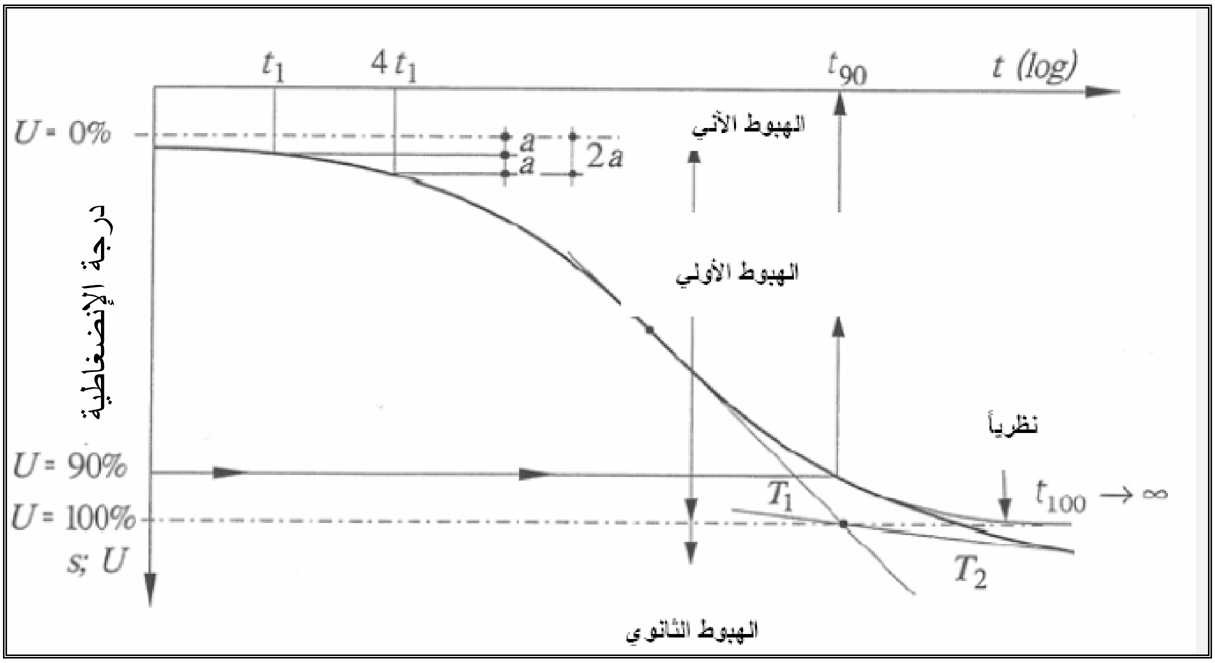
يمكن حساب الهبوط كما ذكر في مدخل البحث بمساعدة بعض القرائن والمعاملات الضرورية للحساب مثل معامل التشوه الخطي و قرينة الإنضغاط والناتجة عن بعض التجارب الحقلية أو المخبرية مثل تجربة تحميل الصفيحة وتجربة ثلاثي المحاور و تجربة الآدومتر وغيرها. يبين الجدول ٢-٢-١ التالي بعض هذه التجارب وشروطها وطرق تنفيذها في الحقل أو في المخبر , وكذلك العلاقة بين الإجهادات والتشوهات فيها كما ورد في /10/ نقلا عن بعض المراجع.

التجربة	تجربة تحميل الصفيحة	تجربة الضغط في محوروواحد	تجربة الضغط المحصور(الآدومتر)
	Plate loading test	**Unconfined compression test**	**Confined compression test**
شكل توضيحي			
الإجهادات والتشوهات	$\varepsilon_x \neq 0$ $\sigma_x \neq 0$	$\varepsilon_x \neq 0$ $\sigma_x = 0$	$\varepsilon_x = 0$ $\sigma_x \neq 0$
العلاقة بين الإجهادات والتشوهات			
معامل التشوه	$\mathbf{E_{PLT}}$	$\mathbf{E_0}$ **, E**	$\mathbf{E_s}$ ($\mathbf{E_{oed}}$)
	Plate-loading modulus	Elasticity modulus	Oedometer modulus
المبدأ	الشروط الطبيعية	مسموح لها التوسع الجانبي	ممنوعة من التوسع الجاتبي
التنفيذ	في الحقل	في المخبر	

الجدول (٢-٢-١) بعض تجارب تعيين معامل التشوه (وقرينة الإنضغاط)

يتألف الهبوط عموماً من ثلاثة أجزاء , حيث يوضح الشكل ٢-٢-١ هذه الأجزاء والعلاقة بين الهبوط النسبي والزمن أثناء الإختبار في الآدومتر بمقياس نصف لوغارتمي حسب طريقة تمثيل Casagrande في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء /4/ , /10/ :

- الهبوط الآني s_0 , ناتج عن تغير توضع الحبات مع ثبات الحجم في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء.
- الهبوط الأولي s_1 , الناتج عن الإنضغاطية (الإنضغاط الرشحي) في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء !
- الهبوط الثانوي s_2, الناتج عن التشوه اللدن , ظاهرة الزحف, التشوهات بسرعة ثابتة , خاصة في الأتربة الغضارية عالية اللدونة و الأتربة العضوية !.



الشكل (٢-٢-١) الأجزاء الثلاثة للهبوط في التربة

الهبوطات في الأتربة غير المترابطة (الخشنة) صغيرة نسبياً وتتم مباشرة بعد تطبيق الحمولة عليها وتنشأ نتيجة لتغير حجم الفراغات فيها (الإرتصاص), أما الهبوطات في الأتربة المترابطة المشبعة بالماء فهي كبيرة نسبياً وتتعلق بالزمن بسبب نفوذيتها القليلة وتنشأ نتيجة لخروج الماء (عصره) من مساماتها وتسمى إنضغاطية (إنضغاط مع الزمن).

بما أن بحثنا يتناول موضوع الإنضغاطية في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء فإن ما يهمنا هو الهبوط الأولي (الإنضغاطية) في المقام الأول والذي يعرّف بأنه نقصان الحجم نتيجة ازدياد الضغط في الوضع المحصور و خروج الماء من مسامات التربة/43/ , و تُدرَس تجريبيا أو مخبريا باستخدام جهاز الآدومتر/10/, /19/.

٢-٣ تجربة الإنضغاطية

تُجرى تجارب الآدومتر التقليدية عادة لتعيين :

- ✓ الضغط المسبق التي تعرضت له التربة أثناء تاريخها الجيولوجي وبالتالي حساب درجة الإنضغاط المسبق OCR, وذلك في التربة الغضارية المسبقة الإنضغاط.
- ✓ القرائن والمعاملات الضرورية الأخرى لمعرفة وتقدير (حساب) مقدار و زمن الهبوط تحت تأثير حمولات المنشآت (مثل C_c قرينة الإنضغاط , C_s قرينة الانتفاخ , C_v معامل الإنضغاط الرشحي , a_v معامل الإنضغاط , m_v معامل الإنضغاط الحجمي (النسبي) و E_{oed} معامل التشوه الآدومتري) /3/, /10/.

يوجد طرق مختلفة لعرض نتائج تجربة الإنضغاطية ومن ثم حساب الهبوط. تمثل نتائج تجربة الإنضغاطية في جهاز الآدومتر عادة كعلاقة بين الضغط المطبق والتشوه النسبي وهي الطريقة المعتمدة في كثير من الدول الأوروبية أو كعلاقة بين الضغط المطبق ومعامل المسامية الطريقة المفضلة في أغلب الدول. وقد بينت معظم الدراسات أن العلاقة بين الضغط المطبق ومعامل المسامية بمقياس نصف لوغارتمي هي علاقة خطية , حيث يُعرَف الميل الثابت للمستقيم الممثل للعلاقة بقرينة الإنضغاط /3/, /4/, /5/, /8/, /10/, /18/, /26/, /27/, /33/ .

☜ **مراحل سير التجربة**

تمر تجربة الإنضغاطية بإختصار بالمراحل التالية (الشكل ٢-٣-١):

١) توضع العينة (1) في حلقة جهاز الآدومتر (2) وتحاط من الأعلى والأسفل بأقراص مسامية (3),

٢) تحمل العينة بالتدريج (4)

- (عادة إبتداءاً من 10-20 kN/m²)

٣) تقاس الهبوطات بواسطة المقياس (5) لكل درجة تحميل خلال أزمنة معينة: عادة

- 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 5, 15, 45 min
- 2, 5, 8, 24h

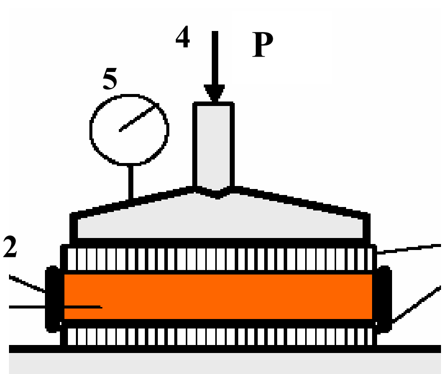
٤) تضاعف الحمولة من درجة إلى أخرى حتى الحمولة الأعظمية: $(\sigma_v + 1.5(\Delta\sigma))$

- (عادة بين 500-1000 kN/m²)
- زمن تأثير كل درجة تحميل و حتى ثبات الهبوط

٥) نرسم منحني العلاقة بين الهبوط النسبي (ε) والزمن t

٦) ونرسم منحني العلاقة بين الضغط σ' والهبوط النسبي (ε)

٧) ونرسم منحني العلاقة بين تزايد الضغط σ' و تناقص (e) معامل المسامية بالإحداثيات النصف لوغارتمية أو بالإحداثيات العادية.



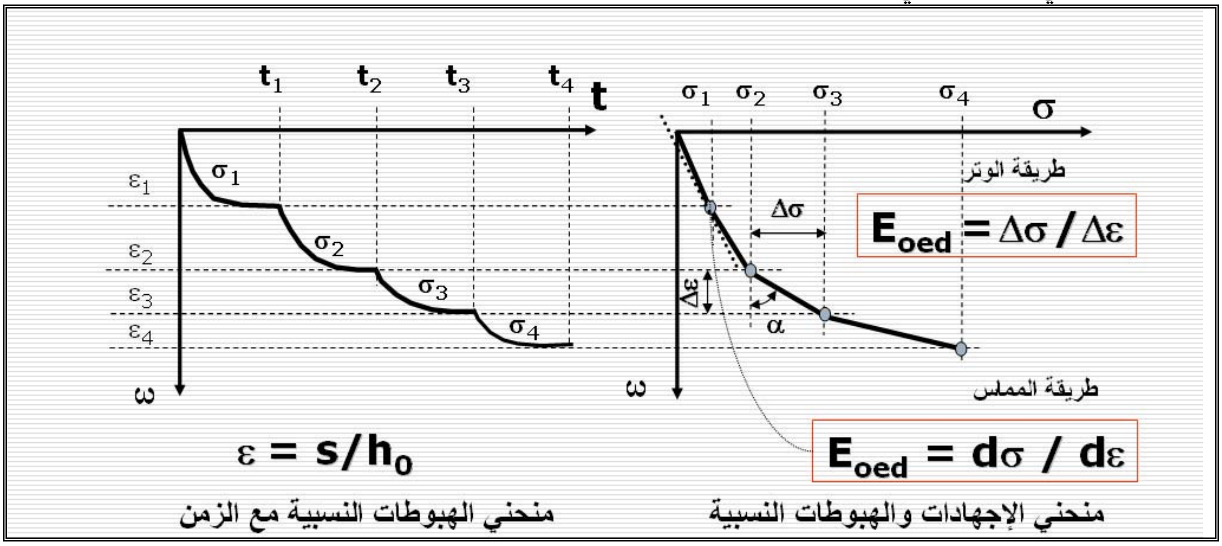


الشكل (٢-٣-١) مراحل إجراء تجربة الإنضغاطية

يعتمد هذا البحث على معامل التشوه الخطي الآدومتري **E_{oed}** وقرينة الإنضغاط **C_C** المستخرجين من تجربة الآدومتر:

☜ **معامل التشوه الخطي الآدومتري E_{oed}**

يبين الشكل ٢-٣-٢ نتائج التجربة (المرحلة ٥ و ٦) , حيث يمكن تعيين **معامل التشوه** **E_{oed}** بالطريقتين الموضحتين في الشكل وهي طريقة الوتر وطريقة المماس.



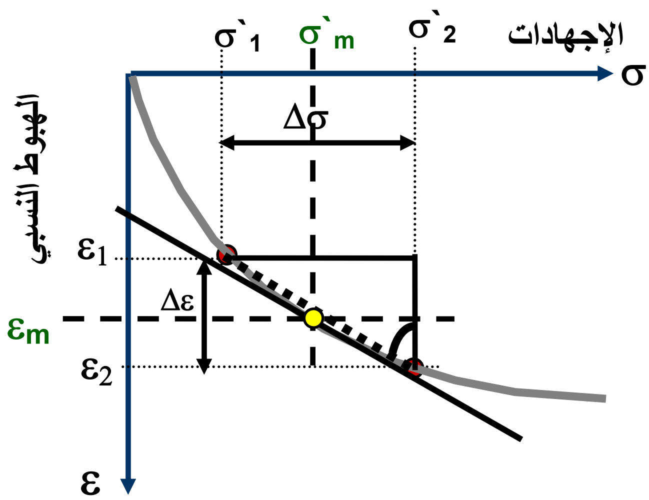
الشكل (٢-٣-٢) نتائج تجربة الآدومتر (كعلاقة بالهبوطات النسبية)

فبطريقة الوتر يحسب **معامل التشوه** E_{oed} من العلاقة (٢-٣-١) التالية كما هو موضح في الشكل ٢-٣-٣ أيضاً , والذي يمثل نسبة تغير الإجهادات (الضغوط) إلى تغير التشوهات النسبية (الهبوطات النسبية) ضمن مجال معين للإجهادات /33/, /38/.

$$E_{oed} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \qquad (٢-٣-١)$$

وبطريقة المماس يحسب **معامل التشوه** E_{oed} من العلاقة (٢-٣-٢) التالية كما هو موضح في الشكل ٢-٣-٣ أيضاً, والذي يمثل المماس في النقطة المطلوب حساب معامل التشوه عندها مشتق الإجهادات (الضغوط) بالنسبة إلى التشوهات النسبية (الهبوطات النسبية) عند قيمة معينة للإجهادات σ'_m.

$$E_{oed} = d\sigma / d\varepsilon \qquad (٢-٣-٢)$$

طريقة الوتر $E_{oed} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ طريقة المماس $E_{oed} = d\sigma / d\varepsilon$	

الشكل (٢-٣-٣) معامل التشوه الخطي E_{oed}

ويرتبط معامل التشوه الخطي E_{oed} بمعامل الإنضغاط a_v ومعامل الإنضغاط الحجمي m_v وذلك إنطلاقا من التعاريف بالعلاقات التالية (العلاقات ٢-٣-٣) /19/, /36/:

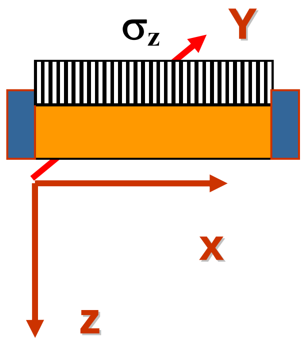
$$E_{oed} = d\sigma / d\varepsilon \;\; , \; E_{oed} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$
$$a_v = - de / d\sigma = - d\varepsilon\,(1+e_0) / d\sigma = - (1+e_0)/E_{oed} \qquad (٢-٣-٣)$$
$$m_v = d\varepsilon / d\sigma = a_v / (1+e_0) = 1 / E_{oed}$$

- في الحالة العامة الفراغية لإنضغاط التربة يجب أن ندرس تأثير الإجهادين الجانبيين (σ_y, σ_x) بالإضافة إلى تأثير الضغط الشاقولي (σ_z). فعندما يتعرض عنصر من التربة إلى ضغوط (إجهادات) في إتجاه المحاور الثلاث فإن التشوهات في إتجاه أحد المحاور تعاق من قبل الضغوط (الإجهادات) المطبقة في إتجاه المحورين الآخرين وبالتالي تصغر وتحسب عندئذ التشوهات النسبية بالعلاقات التالية (العلاقات ٢-٣-٤):

$$\varepsilon_z = (1/E)\,(\sigma_z - \nu\,(\sigma_y + \sigma_x))$$
$$\varepsilon_y = (1/E)\,(\sigma_y - \nu\,(\sigma_z + \sigma_x)) \qquad (٢-٣-٤)$$
$$\varepsilon_x = (1/E)\,(\sigma_x - \nu\,(\sigma_y + \sigma_z))$$

حيث: ν معامل التوسع الجانبي و E معامل التشوه الخطي العام (معامل المرونة)

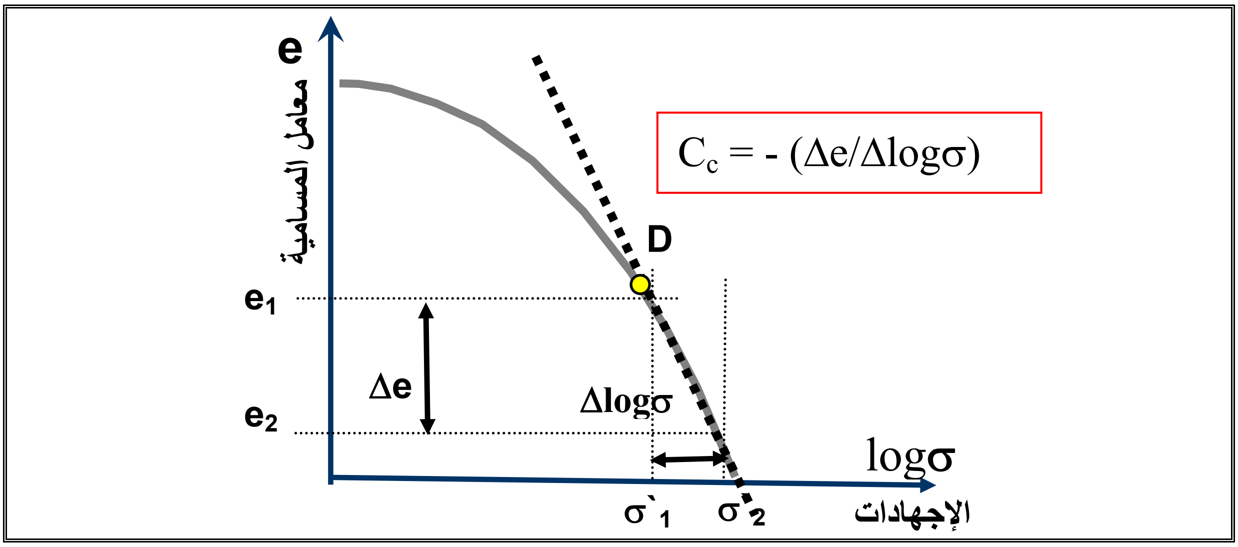
وعندما تكون التربة ممنوعة تماماً من التوسع الجانبي (محصورة) فإنه يكون لدينا نتيجة لذلك الشروط الإجهادية والتشوهات النسبية التالية (الشكل ٢-٣-٤):

الإجهادات والتشوهات	شكل توضوحي
$\sigma_x = \sigma_y \ , \ \varepsilon_z \neq 0 \ , \ \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ بفرض أن: $\boldsymbol{\varepsilon_z = \sigma_z / E_{oed}}$ وأن: $K_0 = \sigma_x / \sigma_z \rightarrow \sigma_x = K_0 \,.\, \sigma_z$ $\nu = - \varepsilon_y / \varepsilon_z$ يكون لدينا: $\varepsilon_y = (1/E)\,(\sigma_y - \nu\,(\sigma_z + \sigma_x)) =$ $\varepsilon_y = (1/E)\,(K_0 \,.\, \sigma_z - \nu\,(\sigma_z + K_0 \,.\, \sigma_z)) = 0$ $K_0 \,.\, \sigma_z\,(1 - \nu) = \nu \,.\, \sigma_z$ $\rightarrow \underline{K_0 = \nu / (1-\nu)}$ أي: $\sigma_x = \sigma_y = (\nu / (1-\nu)) \,.\, \sigma_z$ $\varepsilon_z = (1/E)\,(\sigma_z - \nu\,(\sigma_x + \sigma_y))$ وبالتالي: $\boldsymbol{\varepsilon_z = (\sigma_z / E)\,(1 - 2\nu^2 / (1-\nu))}$ أي: $\boldsymbol{E_{oed} = E / [1 - 2\nu^2 / (1-\nu)]}$	
حيث: K_0 معامل ضغط التربة الجانبي في حالة الراحة	

الشكل (٢-٣-٤) الحالة الفراغية للإجهادات والتشوهات في حالة الضغط المحصور

☜ **قرينة الإنضغاط C_C**

في أغلب الدول كما ذكر سابقا تستخدم العلاقة بين الضغط المطبق وبين معامل مسامية التربة (كما في الشكل ٢-٣-٥) لعرض نتائج التجربة وتعيين قرينة الإنضغاط C_c, والتي تمثل ميل الجزء المستقيم من الشكل الممثل للعلاقة بين الضغط المطبق وبين معامل المسامية (بمقياس نصف لوغارتمي) .



الشكل (٢-٣-٥) نتائج تجربة الآدومتر (كعلاقة بمعامل المسامية)

أي تحسب قرينة الإنضغاط C_c من العلاقة (٢-٣-٥) التالية , بإعتبار اللوغاريتم العشري في عرض نتائج التجربة, الأكثر ذكراً في أغلب المراجع:

$$C_c = - (\Delta e/\Delta \log\sigma) \quad (٢\text{-}٣\text{-}٥)$$

أو من العلاقة (٢-٣-٦) التالية , بإعتبار اللوغاريتم الطبيعي في عرض النتائج كما ورد في المراجع /8/, /26/, /37/ و هي العلاقة المفضلة في بعض الدول الأوروبية :

$$C_c = - (\Delta e/\Delta \ln\sigma) \quad (٢\text{-}٣\text{-}٦)$$

اخترنا في هذا العمل أن نحسب قرينة الإنضغاط C_c كما في العلاقة (٢-٣-٥) الواردة في أغلب المراجع و في الكود المعتمد في البحث /19/ , و عمليا ترتبط العلاقتان مع بعضهما البعض كما هو معروف من خلال العلاقة (٢-٣-٧) التالية بين اللوغاريتم الطبيعي والعشري :

$$\ln (x) = 2.3 \log (x) \quad (٢\text{-}٣\text{-}٧)$$

بمعرفة قيمة قرينة الإنضغاط C_c (وقرينة الإنتفاخ C_S في حالة الأتربة مسبقة الإنضغاط) يمكن حساب الهبوط في طبقة من التربة سماكتها **H** ومعامل مساميتها الإبتدائي $\mathbf{e_0}$ نتيجة لازدياد الإجهادات فيها بقيمة $\Delta\sigma'$ **من العلاقة (٢-٣-٨)** , حيث (أ) تمثل علاقة حساب الهبوط لأتربة منضغطة طبيعيا وتبقى كذلك بعد التحميل و(ب) لأتربة مسبقة الإنضغاط وتصبح منضغطة طبيعياً بعد التحميل /4/, /5/, /22/, /23/, /24/:

$$s_c = [C_c /(1+e_0)] \cdot H \cdot \log [(\sigma'_0 + \Delta\sigma')/ \sigma'_0] \qquad \text{(أ)}$$

(٢-٣-٨)

$$s_c = [C_c /(1+e_0)] \cdot H \cdot \log [(\sigma'_v + \Delta\sigma')/ \sigma'_v] + [C_S /(1+e_0)] \cdot H \cdot \log [(\sigma'_v)/ \sigma'_0] \qquad \text{(ب)}$$

حيث: σ'_0 الإجهاد الموافق لمعامل المسامية الإبتدائي e_0

σ'_v الإجهاد المسبق

ويرتبط معامل التشوه بقرينة الإنضغاط نتيجة لذلك وحسب الطريقتين المذكورتين (طريقة الوتر وطريقة المماس) كما هو مبين في الجدولين التاليين (٢-٣-١ و ٢-٣-٢):

الطريقة	طريقة الوتر	المرجع
التعريف	$E_{oed} = \Delta\sigma'/ \Delta\varepsilon$	/38/,/33/
العلاقة الرياضية	$E_{oed}= (-\Delta\sigma'/ \Delta e) * (1+e_0)$	/33/
	$E_{oed}=((1+e_0)/C_c)*\Delta\sigma'/\log(\sigma'_2/\sigma'_1)$	/38/,/37/

الجدول (٢-٣-١) العلاقة بين معامل التشوه E_{oed} وقرينة الإنضغاط C_c (طريقة الوتر)

الطريقة	طريقة المماس	المرجع
التعريف	$E_{oed} = d\sigma'/ d\varepsilon$	/33/
العلاقة الرياضية	$E_{oed}= (-d\sigma'/ de) * (1+e_0)$	/33/
	$E_{oed}=((1+e_0)/C_c)*\ln 10*\sigma'_m$	/37/

الجدول (٢-٣-٢) العلاقة بين معامل التشوه E_{oed} وقرينة الإنضغاط C_c (طريقة المماس)

و بما أنه من المهم إجراء تجربة الآدومتر بأعلى دقة ممكنة للحصول على قرائن ومعاملات دقيقة كان لابد معرفة العوامل المؤثرة على تجربة الإنضغاطية و الأخطاء الممكن حدوثها حتى نتمكن من تجنبها:

٢-٤ العوامل المؤثرة على تجربة الإنضغاطية (الآدومتر)

١) مؤثرات مستقلة عن الجهاز وهي تضم:

☜ **مؤثرات التربة نفسها (خواصها)**

- التركيب الحبي للتربة وشكل الحبيبات /2/.
- بنية الغضار و نوعه و نسبته /7/ ,/11/.
- التركيب الكيميائي والمينيرالي للتربة /2/, نوع الأيونات الشاردة و كيميائية الماء.
- نسبة المواد العضوية في العينة /2/.
- حد السيولة /2/, حد اللدونة, قرينة اللدونة /11/.
- معامل المسامية, الرطوبة /7/, درجة الإشباع.
- درجة تخرب البنية (الابتعاد عن الحالة الطبيعية) /7/.

☜ **مؤثرات التاريخ الجيولوجي /2/**

- الضغوط (الإجهادات) المسبقة.
- الحالة الاجهادية الحالية, والقيم الناتجة عنها.
- نسبة الضغط المسبق إلى الضغط الحالي الطبيعي.

٢) مؤثرات متعلقة بالجهاز وتقنية التجارب

- نوع الجهاز والعوامل التقنية الأخرى.
- أبعاد العينة و نوع العينة (سليمة , مخربة, مشكلة مخبريا) /2/, /19/,/42/.
- عملية التحميل /42/:
  - الحمولة المطبقة وخطوة التحميل.
  - زمن (مدة) التحميل.
- المحيط وخبرة القائم بالتجربة /2/.

٢-٥ الأخطاء الممكنة /42/, /37/

بالرغم من جميع تدابير العناية والحرص الشديدين تظهر في تجربة الإنضغاط مجموعة من الأخطاء الممكنة الحدوث و التي يمكن أن تؤثر على تجربة الإنضغاط في الأتربة الناعمة (السليمة والمخربة والمشكلة مخبريا) وتعطي نتائجا مغلوطة نسبياً , لذلك لايسمح بالمبالغة في تقييم النتائج (أكثر من اللازم) , وقد بينت الأبحاث والدراسات أنه حتى في المواد المشكلة مخبريا بنفس الشروط من الصعب الحصول على نفس النتائج تماما , وأنه في أفضل الحالات يمكن الحصول من التجارب المعيارية على نتائج تقريبية لمعاملات التربة /37/:

١. **تَخرّب العينة:** يعتبر تغير البنية الطبيعية للتربة أثناء إستخراج وتحضير العينة لإجراء التجربة هو المسؤول عن أكبر خطأ في تعيين الخصائص الهندسية للأتربة غير المخربة أي سليمة البنية في المخبر, حيث يؤثر التخرب الحاصل على علاقة التشوه مع الزمن و كذلك يؤثر على درجة الإنضغاط المسبق ,لذلك يجب الحذر الشديد والعناية والدقة أثناء إستخراج وتحضير العينات وبناؤها في الجهاز, طبعا هذا الخطأ مستبعد في البحث لأن الموضوع يخص الأتربة الناعمة المخربة المعادة التشكيل.

٢. **<u>العينة لا تملأ حلقة الجهاز بشكل كامل:</u>** حجم العينة يجب أن يكون مساوياً تماما للحجم المحصور ضمن حلقة الإنضغاط , وإلا فإنه لن يكون هناك حصر جانبي كامل للعينة و كذلك ستحصل أخطاء بالقيم الإبتدائية للعينة كالوزن الحجمي مثلا وبالتالي خطأ بشروط التجربة الإبتدائية , لذلك لابد من العناية الشديدة أثناء وضع العينة في الجهاز لتلافي هذا الخطأ قدر الإمكان.

٣. **<u>تأثير الشحنات الكهربائية في جهاز الإنضغاطية:</u>** لتجنب التغيرات في خواص الإنضغاطية الناتجة عن هذا التأثير يجب أن تُصنع كل أجزاء الجهاز المعدنية من مواد غير قابلة للصدأ أو التآكل , حيث ينصح بأن تصنع هذه الأجزاء من البلاستيك . صنع الجهاز المستخدم في البحث من مواد معدنية غير قابلة للصدأ أو التآكل.

٤. **<u>الاحتكاك بين العينة وحلقة الإنضغاط:</u>** أوضحت التجارب أنه أكثر من ٢٠% من الحمولة المطبقة على العينة يمكن أن يضيع بسبب الاحتكاك الجانبي الناتج عن التصاق التربة بالحلقة , ويمكن أن يقلل هذا التأثير من خلال :

١- استخدام عينة ذات قطر أكبر.
٢- استخدام عينة ذات سماكة أقل.
٣- تغليف الحلقة بمادة مانعة للاحتكاك.
٤- زيادة رطوبة العينة في التربة المشكّلة مخبرياً /37/.
٥- إزدياد قساوة المادة يمكن أن يؤدي إلى توسع حلقة الإنضغاط أثناء عملية الإنضغاط وبالتالي إعطاء قيم أكبر للإنضغاط /37/.

٥. **<u>أن تكون النفاذية في الأقراص المسامية صغيرة:</u>** يتأثر معدل الإنضغاطية المقاس بشكل ملحوظ بنفاذية الأقراص المسامية. لذلك يجب تنظيف الأقراص المسامية بعد كل تجربة لإزالة حبات التربة العالقة فيها, كما يتم إختيار القرص المسامي ذو النفاذية المناسبة لنوع التربة كما هو موضح في الجدول (٢-٥-١)/33/:

التربة	قيمة نفاذية القرص المسامي k (m/s)			
التربة خشنة	من	10^{-3} m/s	إلى	10^{-4}m/s
التربة مختلطة	من	10^{-5} m/s	إلى	10^{-6}m/s
التربة ناعمة	من	10^{-6} m/s	إلى	10^{-7}m/s

الجدول (٢-٥-١) نفاذية الأقراص المسامية المطلوبة في تجربة الآدومتر (حسب نوع التربة)

٦. **<u>عامل زيادة (خطوة) التحميل غير الملائم:</u>** يعتمد هذا العامل على الهدف من التجربة, عامل زيادة التحميل عادة يساوي ٢ يعني ضعف الحمولة الكلية في كل خطوة تحميل و قد لا تكون هذه القيمة مرضية أحياناً, فمثلا من الأفضل في العينات الغير مخربة إختيار قيمة أدنى ١,٥ أو ١,٢٥ لتحديد قيمة الضغط المسبق بوضوح.

٧. **ارتفاع العينة غير كاف:** إن ارتفاع العينة سيقرر إمكانية كشف الإنكسار بمنحني الإنضغاط مع الزمن بوضوح و الذي يدلنا على إنتهاء الإنضغاط الأولي وذلك اعتمادا على خواص التربة, فإذا كانت العينة رقيقة جداً, فإن حدوث الإنضغاط قد يكون سريع, وبالمقابل إذا كانت العينة سميكة فإن انكسار المنحني يمكن أن يُخفى بالإنضغاط الثانوي.

٨. **ميل الصفيحة العلوية:** وهو خطأ كبير نسبيا , لاينتبه إليه عادة , والذي يؤدي إلى تشوهات غير منتظمة وتتعرض الحلقة المحيطة بالعينة إلى قوى شاقولية لايمكن التحكم بها /37/.

٩. **خروج التربة من محيط حلقة الإنضغاط:** أثناء تحميل عينات الأتربة ذات الرطوبات الإبتدائية العالية (تقريبا عند أو أكبر من حد السيولة) وهو خطأ متعلق بنوع التربة وطريقة تحضيرها وتحميلها وبخبرة القائم بالتجربة , حيث بينت الدراسات أن خروج التربة المشكلة مخبريا برطوبات عالية مثلا عند حد السيولة من محيط حلقة الإنضغاط يقل ويتلاشى أحيانا إذا تركت العينة مدة ٢٤ ساعة قبل بنائها في الحلقة و تشتد الروابط بين حبات التربة , كما ينصح أن يتم تحميل العينة ببطء شديد وبعناية فائقة إبتداءا من حمولات صغيرة نسبيا , وبينت الدراسات أنه رغم الحذر الشديد والعناية الفائقة لايمكن تلافي هذا الخطأ بشكل كامل دائما كما ورد في /21/ نقلا عن بعض الأبحاث والدراسات. تم إجراء التجارب في هذا العمل بعناية وحرص شديدين وأعيدت التجارب التي خرجت فيها المادة بشكل ملحوظ من محيط حلقة الإنضغاط أثناء التحميل .

٢-٦ دراسة العلاقات التجريبية لتقدير قرينة الإنضغاط

بعد دراسة مجموعة كبيرة من المراجع و الأبحاث و الدراسات المتعلقة بموضوع البحث وهو تأثير خواص التربة وخاصة حدود أتربرغ و الفعّالية و الفعّالية المعدّلة على قرينة الإنضغاط ومعامل التشوه في الأتربة الناعمة المشبعة بالماء , لوحظ وجود عدد كبير من العلاقات التجريبية لتقدير قرينة الإنضغاط وبالتالي معامل التشوه الخطي والتي تزيد عن ١٠٠ علاقة تجريبية لعديد من العلماء في أزمنة ودول مختلفة.

و لدراسة هذه العلاقات بشكل مفصل ودقيق تم تقسيمها حسب العوامل (المتحولات) الداخلة فيها إلى ستة مجموعات:

١) - العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بمعامل المسامية الإبتدائي e_0 — $\mathbf{C_c = f\ (e_0)}$

٢) - العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بالرطوبة الإبتدائية w_0 — $\mathbf{C_c = f\ (w_0)}$

٣) - العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بحد السيولة w_L — $\mathbf{C_c = f\ (w_L)}$

٤) - العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بقرينة اللدونة I_P — $\mathbf{C_c = f\ (I_P)}$

٥) - العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بعوامل خاصة (مثل معامل المسامية عند حد السيولة e_L, المسامية الإبتدائية n_0 , الوزن الحجمي الجاف γ_d) — $\mathbf{C_c = f\ (?)}$

٦) - العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بأكثر من متغير (متحول) — $\mathbf{C_c = f\ (???)}$

٢-٦-١ العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بمعامل المسامية الإبتدائي e_0

تم جمع جميع العلاقات التي تمكنّنا من حساب قرينة الإنضغاط كتابع لمعامل المسامية الإبتدائي من المراجع المتوفرة و ترتيبها في الجدول (٢-٦-١) , والذي يبين وجود ٣٤ علاقة تجريبية للحساب على الأقل, حيث R^2 الوارد في الجداول اللاحقة معامل الارتباط وهو معامل احصائي يعبر عن دقة العلاقة , حيث تزداد الدقة بزيادته كما هو موضح في الجدول التالي /47/:

معامل الإرتباط	وصف الدقة
0	لايوجد إرتباط
$0 < R^2 \leq 0,2$	إرتباط قليل جدا
$0,2 < R^2 \leq 0,5$	إرتباط قليل
$0,5 < R^2 \leq 0,7$	إرتباط متوسط
$0,7 < R^2 \leq 0,9$	إرتباط عالي
$0,9 < R^2 \leq 1$	إرتباط عالي جدا
$R^2 = 1$	إرتباط كامل

من أجل دراسة هذه العلاقات ومحاولة معرفة أوجه التشابه أوالإختلاف فيما بينها , ولنتمكن من مقارنتها مع بعضها البعض تم رسمها بيانيا في مجموعة من المخططات , كل مخطط منها يحوي العلاقات المتماثلة من حيث شروط التطبيق وخاصة نوع التربة , والمشكلة هنا هي تحديد هذه الشروط , حيث أنه في كثير من المراجع لم يحدد ذلك بوضوح , ففي بعض العلاقات ذكر بأنها صالحة لكل أنواع الغضار (العلاقات ١, ٢, ٣, ١٠, ١٦, ٣١) وفي بعضها الآخر بأنها صالحة لكل الأتربة كما في العلاقتين ١٧, ١٨ أو بأنها صالحة لنوع معين من الغضار المأخوذ من مدينة أو منطقة معينة كما في العلاقات ٦, ٧, ٩, ١٢, ١٣, ١٥, ٣٢, ٣٣, ٣٤ دون تحديد خواص ونوع العينات (سليمة أو مخربة أو معاد تشكيلها) , أما العلاقات الواضحة نسبياً من حيث التطبيق فقد كانت قليلة.

من هذا المنطلق تم تمثيل هذه العلاقات بشكل بياني نتج عنه مجموعة مخططات مختلفة بحسب شروط التطبيق وهو نوع التربة التي يمكن تطبيق العلاقة عليها وبإستخدام قيم **العوامل الناتجة عن الأتربة** الأربعة المختارة في هذا البحث والتي سيرد ذكرها لاحقا:

- العلاقات التي ذكر بأنها لعينات معاد تشكيلها.
- العلاقات التي ذكر بأنها لعينات سليمة.
- العلاقات المتبقية (التي لم يرد في شروطها معلومات عن سلامة العينات).

المرجع	نوع التربة	العلاقة	الباحث	العام	الرقم
/12/ , /14/ , /44/	كل أنواع الغضار المشبع	$C_c = 1{,}15 * (e_0 - 0{,}35)$	Nishida	1956	1
/15/	كل أنواع الغضار		Azzouz	1976	
/3/ , /13/ , /14/	كل أنواع الغضار	$C_c = 1{,}15 * (e_0 - 0{,}27)$	Nishida	1956	2
/25/	كل أنواع الغضار		Rendon and Herrero	1980	
/14/	كل أنواع الغضار	$C_c = 1{,}15 * (e - e_0)$	Nishida	1956	3
/4/ , /12/ , /14/ , /46/	غضار سليم البنية الأتربة الطبيعية	$C_c = 0{,}54 * (e_0 - 0{,}35)$	Nishida	1956	4
/3/ , /14/	غضار سلتي (معاد تشكيله)	$C_c = 0{,}30 * (e_0 - 0{,}27)$	Hough	1957	5
/15/	أتربة متماسكة غير عضوية (سلتية غضارية ;غضارية سلتية)		Azzouz	1976	
/12/	غضار سليم البنية		Rendon and Herrero	1980	
/3/ , /13/	غضار برازيلي	$C_c = 0{,}256 + 0{,}43 * (e_0 - 0{,}84)$	Cozzolino	1961	6
/3/	خليط غضاري من مدينة Sau Paulo	$C_c = 1{,}21 + 1{,}055 * (e_0 - 1{,}87)$	Cozzolino	1961	7
/1/	غضار مدينة Sau Paulo		Azzouz et al.	1976	

الجدول (٢-٦-١) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي

الرقم	العام	الباحث	العلاقة	R^2	نوع التربة	المرجع
8	1970	**Sowers**	$C_c = 0{,}75 * (e_0 - 0{,}50)$		أتربة منخفضة اللدونة جداً	/3/
	1984	**Bowles**			أتربة منخفضة اللدونة	/14/
9	1976	**Azzouz et al.**	$C_c = 0{,}208 * e_0 + 0{,}0083$		غضار مدينة شيكاغو	/1/ , /15/
	1980	**Rendon and Herrero**			غضار مدينة شيكاغو	/25/
10	1976	**Azzouz**	$C_c = (1 + e_0) * (0{,}156 * e_0 - 0{,}0107)$		كل أنواع الغضار	/15/
	1970	**Krizek&Elnaggar**			$e_0<2$ - كل أنواع الغضار	/44/
	-	**Krizek & Pamalee**			$e_0<2$ غضار	/12/
11	1976	**Azzouz et al**	$C_c = 0{,}4 * (e_0 - 0{,}25)$		كل الأتربة الطبيعية للأتربة سليمة البنية غضار	/3/ /12/ /44/
	2001	**Lav & Ansal**		0,765	-	/3/
12	1980	**Ruppert**	$C_c = 0{,}24 * e_0 + 0{,}03$		غضار Lauenberger	/14/
13	1985	**Bowles**	$C_c = 1{,}21 + 1{,}005 * (e_0 - 1{,}87)$		غضار مدينة Sau Paulo	/14/
14	1985	**Nagaraj and Murty**	$C_c = 0{,}39 * e_0$		-	/4/
15	1989	**Moh & Kol**	$C_c = 0{,}54 * (e_0 - 0{,}23)$		غضار و سيلت Taipei	/13/

تتمة الجدول (٢-٦-١) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي

المرجع	نوع التربة	R^2	العلاقة	الباحث	العام	الرقم
/13/	غضار	-	$C_c = 2.303\left(1-\left(\frac{0,4}{e_0}\right)^2\right)$	Pestana	1994	16
/3/	كل الأتربة	0,785	$C_c = 0,485 * \ln e_0 + 0,329$	Lav & Ansal	2001	17
/3/	كل الأتربة	0,817	$\ln C_c = 1,272 * \ln e_0 - 1,282$	Lav & Ansal	2001	18
/3/	أتربة منخفضة اللدونة	0,82	$\ln C_c = 1,43 * \ln e_0 - 1,19$	Lav & Ansal	2001	19
/3/	أتربة منخفضة اللدونة	0,8	$C_c = 0,407 * e_0 - 0,094$	Lav & Ansal	2001	20
/3/	أتربة منخفضة اللدونة	0,814	$C_c = 0,317 + 0,338 * \ln e_0$	Lav & Ansal	2001	21
/3/	منضغطة طبيعيا	0,89	$C_c = 0,43 * e_0 - 0,122$	Lav & Ansal	2001	22
/3/	$w_L \geq 0.3$	0,736	$C_c = 0,405 * e_0 - 0,064$	Lav & Ansal	2001	23
/11/	غضار معاد تشكيله برطوبة مساوية لرطوبة حد السيولة	0,993	$C_c = 0,5269 * e_0 - 0,2117$	Amit Nath & S.S. DeEalal	2004	24
/11/	غضار معاد تشكيله برطوبة مساوية لرطوبة حد السيولة	0.934	$C_c = (1+e_0) * (0,0888 * e_0 - 0,0525)$	Amit Nath & S.S. DeEalal	2004	25

تتمة الجدول (٢-٦-١) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي

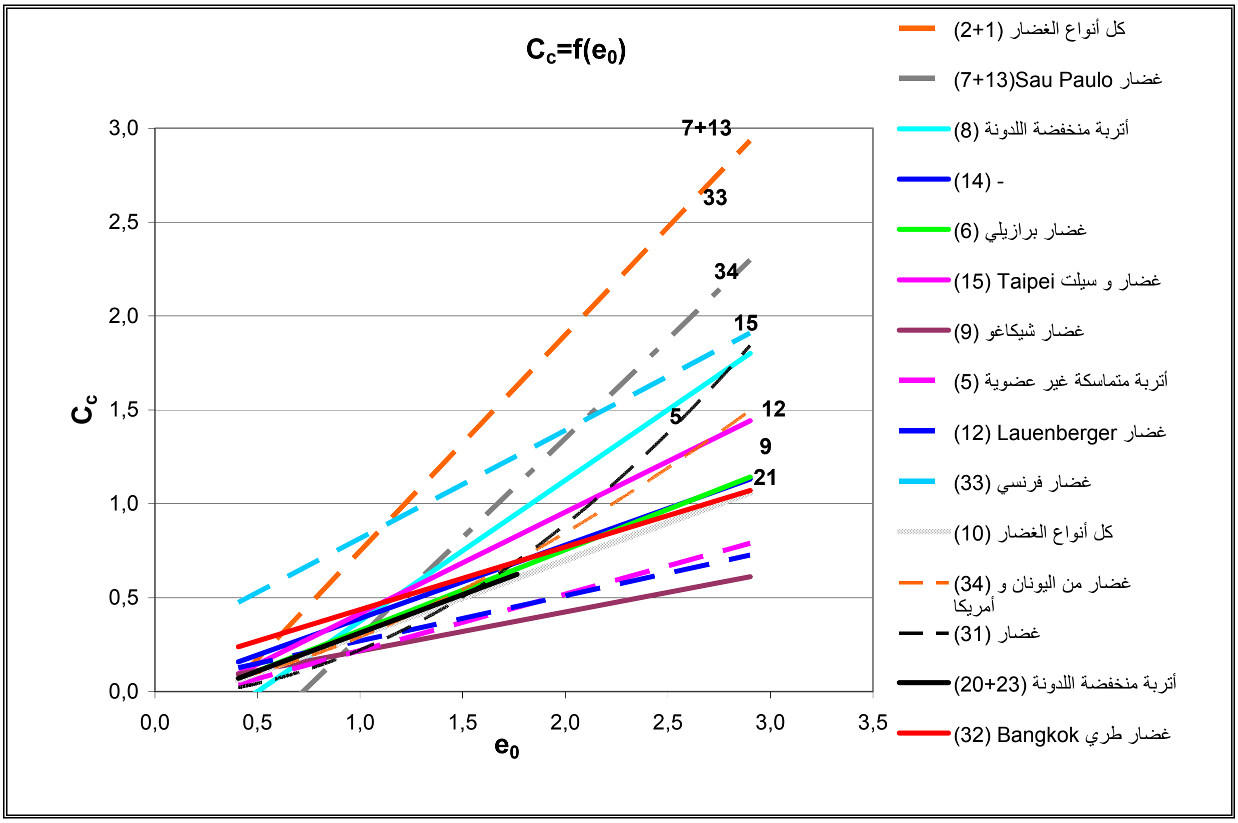
المرجع	نوع التربة	العلاقة	الباحث	العام	الرقم
/6/	غضار معاد تشكيله	$C_c = 0.39 * e_0$	**Ohtsubo**	-	**26**
/6/	غضار معاد تشكيله	$C_c = 0,23 * e_0$	**Tatsuya Koumoto & Yasutaka Otsuka**	-	**27**
/6/	غضار سليم البنية	$C_c = e_0 /(2,02 - 0,087 * e_0)$	**Tatsuya Koumoto & Yasutaka Otsuka**	-	**28**
/6/	غضار سليم البنية	$C_c = 0.37 * e_0^{1.59}$	**Fujikawa et el**	-	**29**
/12/	غضار غير عضوي, غضار سلتي, معاد تشكيله	$C_c = 0,4049 * (e_0 - 0,3216)$	**Hough**	-	**30**
/12/	غضار clay-loam	$C_c = (1 + e_0) * (0,156 * e_0 + 0,0107)$	**Krizek & Pamalee**	-	**31**
/44/	غضار طري من Bangkok	$C_c = 0,29 * e_0 + 0,22$	**Adikari**	**1977**	**32**
/44/		$C_c = 0,575 * e_0 + 0,241$	**Vidalie**	**1977**	**33**
/44/	غضار من اليونان و امريكا	$C_c = 0,14 * (1 + e_0) * (e_0 + 0,007)$	**Azzouz et al.**	**1976**	**34**

تتمة الجدول (٢-٦-١) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي

كما هو واضح في الجدول (٢-٦-١) فإن أغلب العلاقات الواردة هي علاقات خطية من الدرجة الأولى لها الشكل التالي (العلاقة ٢-٦-١) , حيث (a, b) ثوابت هذه العلاقات:

$$C_C = a * e_0 \pm b$$
$$\ln C_C = a * \ln e_0 \pm b \qquad (٢-٦-١)$$

- **العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي** *والتي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات عن سلامة العينات* **(الشكل ٢-٦-١)**

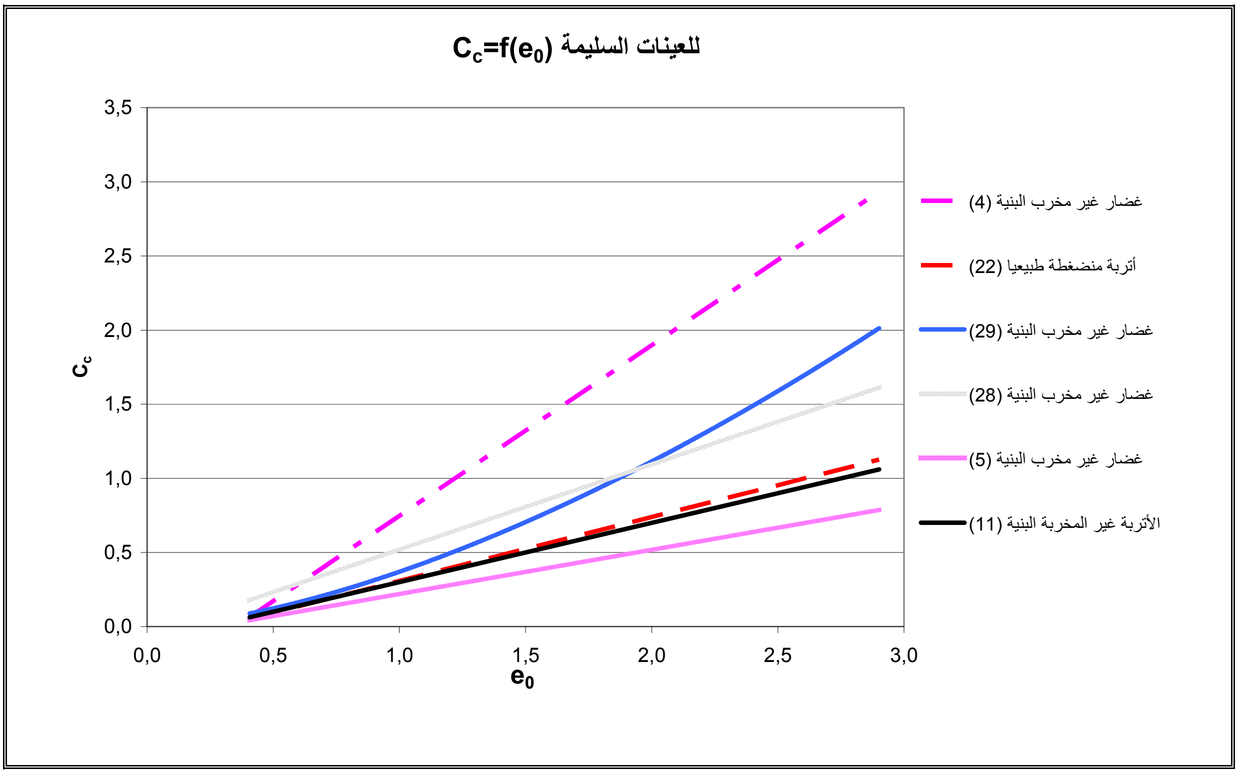


الشكل (٢-٦-١) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي (و التي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات عن سلامة العينات)

نلاحظ من الشكل (٢-٦-١) أن ميول هذه العلاقات الممثلة بالثابت a تتغير ضمن مجال كبير نسبياً من (٠,٢ في العلاقة ٩ (غضار شيكاغو) و حتى ١,١٥ في العلاقة ١ (جميع أنواع الغضار).
كما نلاحظ أن الإختلاف بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من تلك العلاقات يزداد كلما ازدادت قيمة e_0.
وكذلك منحنيات العلاقات (٦, ١٠, ١٤, ٢٠, ٢٣, ٣٢) قريبة من بعضها البعض على الرغم من إختلاف أنواع الأتربة المذكورة عن صلاحية تطبيقها مثل كل الأتربة, غضار, غضار طري, أتربة منخفضة اللدونة.

كل ذلك يشير إلى وجود عوامل أخرى مؤثرة يمكن أن تمكننا من تقييم هذه العلاقات بشكل أفضل غير نوع التربة فقط.

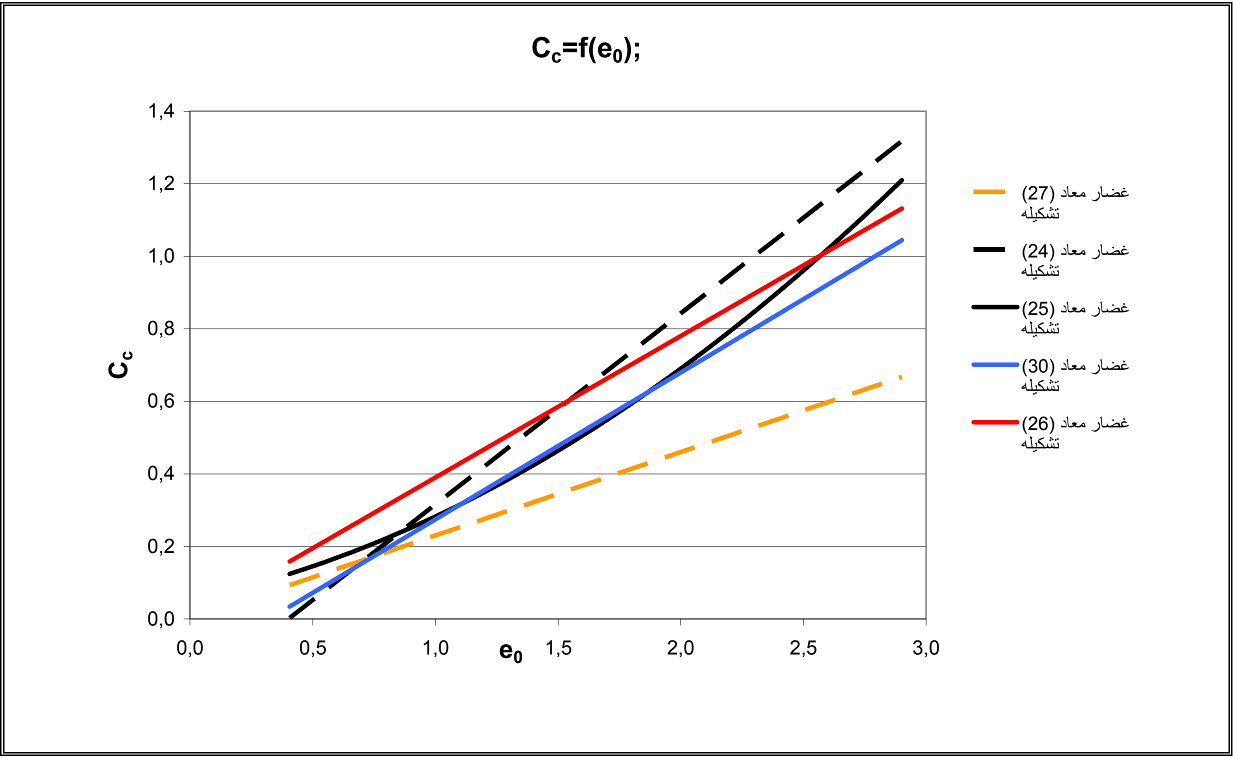
العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي *لعينات غير مخربة, سليمة* **(الشكل ٢-٦-٢)**



الشكل (٢-٦-٢) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية لعينات سليمة البنية

الشكل (٢-٦-٢) والذي يمثل العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي لعينات سليمة لايختلف عن الشكل (٢-٦-١) , حيث نلاحظ أن مجال تغير قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن هذه العلاقات تتباين بشدة فيما بينها على الرغم من أنها جميعا مشروطة بغضار غير مخرب, كما أن التباين بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من هذه العلاقات المختلفة يتناسب طردا مع زيادة قيمة e_0. مما يشير أيضاً إلى وجود عوامل أخرى مؤثرة يمكن أن تمكننا من تقييم هذه العلاقات بشكل أفضل غير نوع التربة ودرجة تخرب العينات فقط.

العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي *لعينات مشكّلة مخبرياً* **(الشكل ٢-٦-٣)**



الشكل (٢-٦-٣) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي
(لعينات مشكلة مخبريا)

من الملاحظ في الشكل (٢-٦-٣) والذي يمثل العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي لعينات معاد تشكيلها وجود إختلافات أيضاً بالرغم من أن مجال الإختلاف يصغر عما ورد في الشكلين السابقين (٢-٦-١ و ٢-٦-٢).

☑ ويمكن أن نستنتج عموماً أن التباين بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقات السابقة حتى المتماثلة منها من حيث شروط التطبيق, لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات أخرى غير نوع التربة أو درجة تخرب العينة , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط من معامل المسامية الإبتدائي وحده هو أمر غير مرض وغير كاف .

٢-٦-٢ العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية w_0 أو الرطوبة الطبيعية w_n

كذلك تم جمع جميع العلاقات التي تمكّننا من حساب قرينة الإنضغاط كتابع للرطوبة الإبتدائية أو الطبيعية من المراجع المتوفرة و ترتيبها في الجدول (٢-٦-٢) , والذي يبين وجود ١٩ علاقة تجريبية للحساب على الأقل.
بنفس الطريقة السابقة , تم رسم العلاقات بيانيا في مخططات مع إختيار العلاقات المتماثلة من حيث شروط التطبيق , وقد كانت المشكلة من جديد في شروط تطبيق هذه العلاقات , حيث أنه في أغلب العلاقات لم يحدد في المراجع بوضوح نوع وخواص التربة أو سلامتها, ففي بعضها ورد بأنها علاقة صالحة لكل الأتربة كما في العلاقات ٧, ٨, ١٠, ١١, ١٤, ١٧ أو بأنها أجريت على غضار مأخوذ من مدينة أو منطقة معينة دون تحديد نوع العينات , سليمة أو مخربة أو معاد تشكيلها كما في العلاقات (١, ٤, ٦, ١٨, ١٩), بينما كانت العلاقات الواضحة من حيث شروط التطبيق قليلة.

في هذه المجموعة لم نجد أي علاقة ذُكر بشكل واضح بأنها صالحة للأتربة المشكلة مخبرياً, لذلك مثلت العلاقات حسب نوع التربة الوارد في المرجع التي يمكن تطبيق العلاقة عليها:

- العلاقات التي ورد بأنها صالحة لعينات غير مخربة (سليمة).
- العلاقات التي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات واضحة عن درجة تخرب العينات .

الرقم	العام	الباحث	العلاقة	نوع التربة	المرجع
1	1954	**Peck and Reed**	$C_c = \frac{17,66 * w_n^{\ 2}}{100000} + \frac{5,93 * w_n}{1000} - \frac{1,35}{10}$	-	/3/
	1976	**Azzouz**		غضار مدينة شيكاغو	/15/
2	1958	**Moran Proctor Mueser and Rutledge**	$C_c = 0,0115 * w_n$	-	/3/
	1976	**Azzouz et al.**		أتربة عضوية , غضار و سيلت عضوي	/1 /, /4/ , /15/ , /46/
	1984	**Bowles**		أتربة عضوية	/14/
3	1970	**sower**	$C_c = 0,75*(w_0 - 0,50)$	أتربة منخفضة اللدونة جداً	/13/
4	1972	**Osterberg**	$C_c = 0,01 * w_n$	غضار مدينة شيكاغو	/3/
	1976	**Azzouz et al.**		غضار مدينة شيكاغو	/1/
	1981	**Koppula**		غضار مدينة شيكاغو و من **Alberta Province** الكندي	/14/
	1984	**Bowles**		غضار مدينة شيكاغو و من **Alberta Province**الكندي	/14/ , /15/
5	1976	**Azzouz et al**	$C_c = 0,01*(w_n - 5)$	كل الأتربة الطبيعية الأتربة غير المخربة	/2 /, /3/ /12/
6	1991	**Scherzinger**	$C_c = 0,00454 * (w_n - 10)$	أتربة طرية من جنوب ألمانيا	/14/

الجدول (٢-٦-٢) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الطبيعية أو الإبتدائية

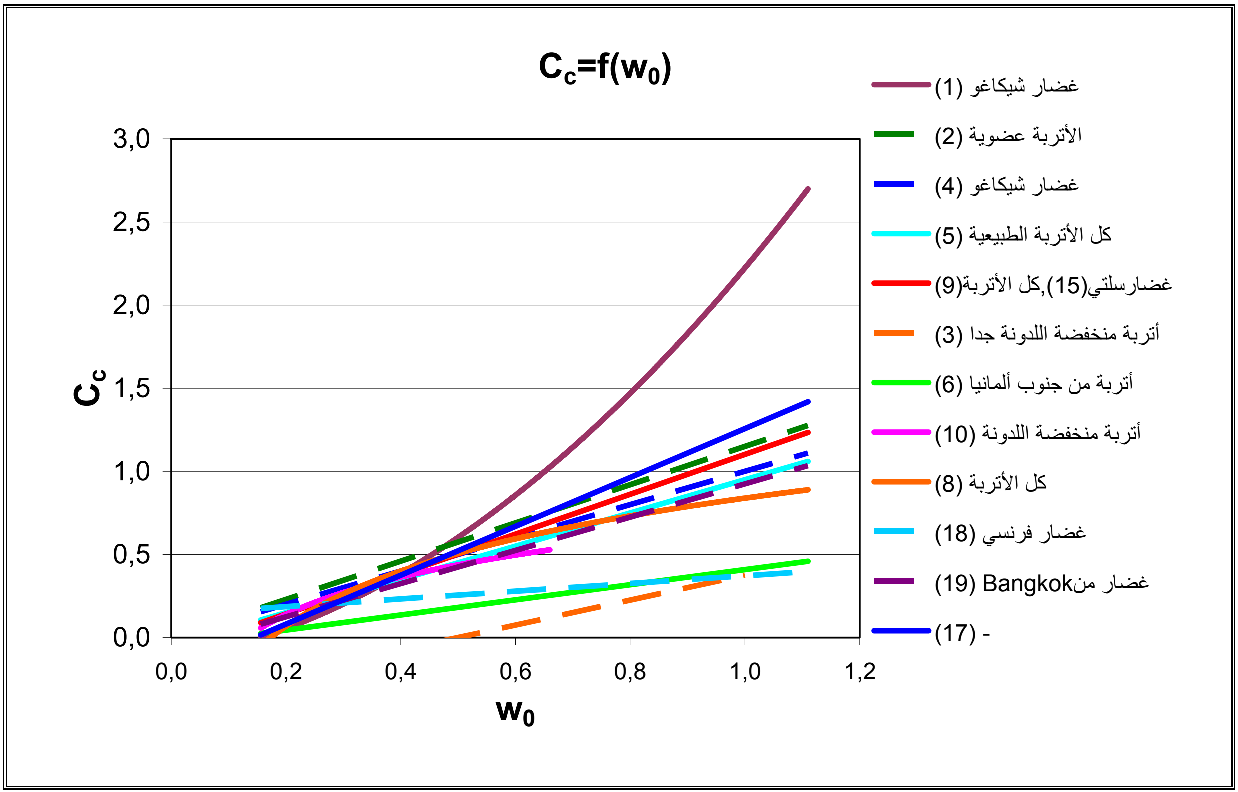
المرجع	نوع التربة	R^2	العلاقة	الباحث	العام	الرقم
/3/	كل الأتربة	0,803	$\ln C_c = 1,235 * \ln w_n - 5,65$	Lav & Ansal	2001	7
/3/	كل الأتربة	0,784	$C_c = 0,479 * \ln w_n - 1,367$	Lav & Ansal	2001	8
/3/	كل الأتربة	0,758	$C_c = 0,012 * w_n - 0,1$	Lav & Ansal	2001	9
/3/	أتربة منخفضة اللدونة	0,762	$C_c = 0,326 * \ln w_n - 0,838$	Lav & Ansal	2001	10
/3/	أتربة منخفضة اللدونة	0,744	$C_c = 0,012 * w_n - 0,086$	Lav & Ansal	2001	11
/3/	أتربة مسبقة الإنضغاط	0,721	$C_c = 0,481 * \ln w_n - 1,376$	Lav & Ansal	2001	12
/3/	أتربة منضغطة طبيعيا	0,877	$C_c = 0,012 * w_n - 0,098$	Lav & Ansal	2001	13
/3/	العينات السليمة $I_L \geq 0.2$	0,716	$C_c = 0,012 * w_n - 0,085$	Lav & Ansal	2001	14
/12/	غضار غير عضوي , غضار سيلتي		$C_c = 0,0102 * (w_0 - 9,15)$	Hough	-	15
/12/	غضار غير مخرب و السيلت الرسوبي		$C_c = 0,01 * (w_0 - 7,548)$	Serajuddin:	-	16
/12/	$w_0 < 100$		$C_c = 0,0039 * (w_0 - 0,013)$	Vidalie	1977	17
/44/	غضار فرنسي		$C_c = 0,0147 * w_n - 0,213$	Vidalie	1977	18
/44/	غضار طري من Bangkok		$C_c = 0,008 * w_n + 0,20$	Adikari	1977	19

تتمة الجدول (٢-٦-٢) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الطبيعية أو الإبتدائية

أغلب العلاقات كانت أيضاً علاقات خطية من الدرجة الأولى لها الشكل التالي (العلاقة ٢-٦-٢) بإستثناء العلاقتين (١, ٧) فقد إختلفتا عن ذلك , حيث (a, b) ثوابت هذه العلاقات:

$$C_c = a*w_0 \pm b$$
$$C_c = a*\ln(w_0) - b \qquad (٢-٦-٢)$$

العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية (أو الطبيعية) *والتي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات عن سلامة العينات* **(الشكل ٢-٦-٤)**

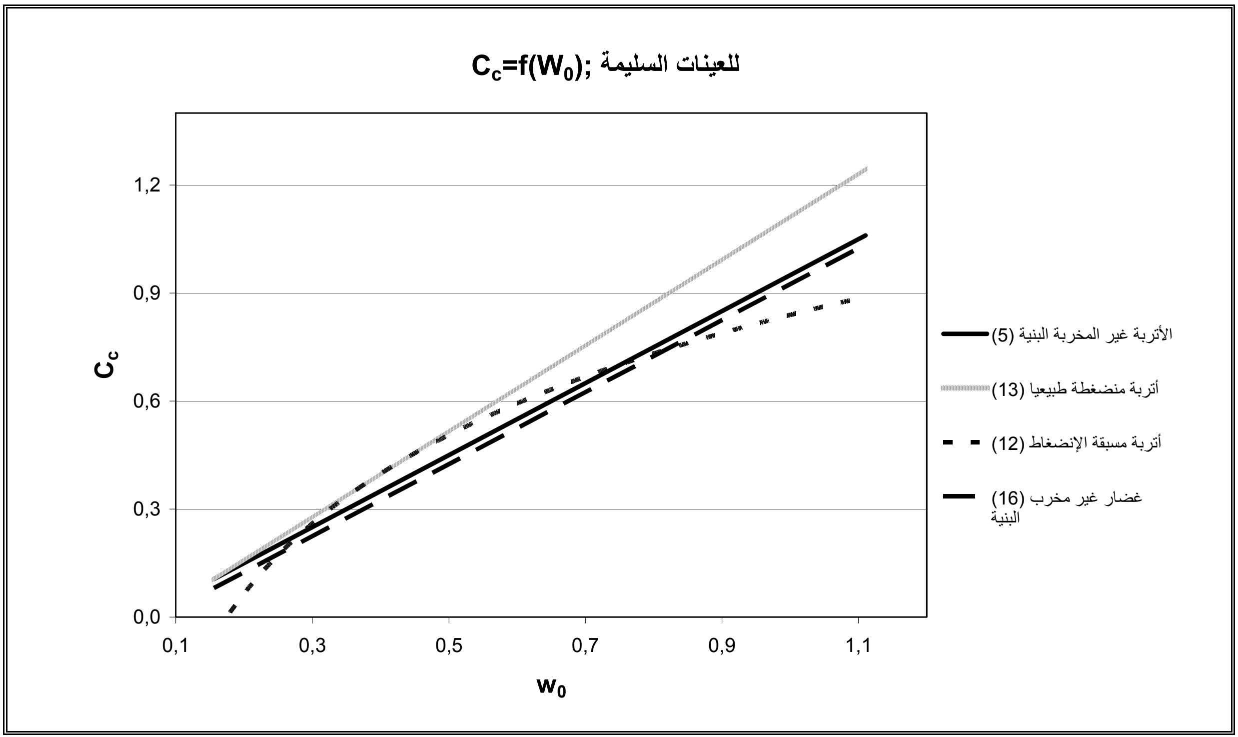


الشكل (٢-٦-٤) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية
(و التي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات عن سلامة العينات)

كما هو واضح في الشكل (٢-٦-٤) فإن أغلب منحنيات العلاقات متقاربة ومتقاطعة مع بعضها البعض (العلاقات ٢, ٤, ٨, ٩, ١٠, ١٥, ١٨, ١٩) بالرغم من إختلاف شروط التطبيق و هي نوع التربة, فالعلاقة (٢) صالحة للأتربة العضوية والعلاقة (١٥) للأتربة الغضارية غير العضوية مع أن وجود المواد العضوية يؤثر بشدة على قرينة الإنضغاط /٢/ , كما أن العلاقة (١) بعيدة عن بقية العلاقات على الرغم من أنها لغضار شيكاغو كما في العلاقة (٤) أيضاً , وأن العلاقتين أقترحتا من نفس الباحث Azzouz.

كما أن بعض الباحثين يعتبر قرينة الإنضغاط سالبة كالعلاقة (٣) عندما تكون الرطوبة أقل من ٠,٥ والبعض الآخر موجبة دون ذكر ذلك صراحة , هذا بالإضافة إلى التباين الواضح في بعض المنحنيات .

العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية (أو الطبيعية) *لعينات غير مخربة (سليمة)* **(الشكل ٢-٦-٥)**



الشكل (٢-٦-٥) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية
(لعينات سليمة البنية)

وهنا نلاحظ أيضاً كما هو واضح في الشكل (٢-٦-٥) أن المنحنيات متقاربة من بعضها البعض كالعلاقتين (٥, ١٦). أما منحني العلاقة (١٢) فهو مختلف قليلا وذلك بسبب كونه يصلح للأتربة مسبقة الإنضغاط حسب ماورد في المرجع /٣/ .

☑ ويمكن أن نستنتج عموماً أن التباين بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقات السابقة حتى المتماثلة منها من حيث شروط التطبيق , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات أخرى غير نوع التربة أو درجة تخرب العينة , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط من الرطوبة الطبيعية أو الإبتدائية وحدها بالرغم من تقارب بعض المنحنيات من بعضها البعض هو أمر غير مرض وغير كاف .

٢-٦-٣ العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بحد السيولة w_L

بنفس المنهجية السابقة , تم جمع جميع العلاقات التي تحسب قرينة الإنضغاط كتابع لرطوبة حد السيولة في التربة (من المراجع المتوفرة و تم ترتيبها في الجدول (٢-٦-٣) التالي , والذي يوضح وجود ١٦ علاقة تجريبية على الأقل.
في البداية كان لابد من جمع العلاقات المتماثلة من حيث شروط التطبيق أيضاً حتى نتمكن من مقارنتها مع بعضها البعض , وكانت المشكلة ذاتها , أي في تحديد نوع التربة ومواصفاتها (المرافق للعلاقة) , حيث ذكر في بعض المراجع بأن العلاقة صالحة لكل الأتربة كما في العلاقات ٥, ١٠ أو صالحة لجميع أنواع الغضار كما في العلاقات ٧, ١٥ أو بأنها صالحة لغضار معين , مأخوذ من مدينة أو منطقة ما دون تحديد نوع العينات سليمة أو مخربة أو معاد تشكيلها كما في العلاقات ٤, ٨, ٩, ١٦.

بمقارنة العلاقات مع بعضها البعض لوحظت في بعض المراجع بعض التناقضات في شكل العلاقتين (١, ٢) للعالم سكيمبتون للأتربة المشكلة مخبرياً حيث إختلفتا بقيمة الثابت الداخل في العلاقة وفي صلاحية تطبيق العلاقة (٢) أي عما إذا كانت صالحة التطبيق في الأتربة المشكلة مخبرياً أو في الأتربة غير المخربة, وكلاهما ورد في أكثر من مرجع (الجدول ٢-٦-٣). ولابد هنا من الإشارة أن علاقات سكيمبتون لحساب قرينة الإنضغاط هي أكثر العلاقات وروداً وتطبيقاً في أغلب المراجع.
بالنسبة للعلاقة (١٠) كان من غير الممكن تطبيقها باعتبار أنه لم يرد في المرجع /13/ أي شرح للرمز a الوارد فيها , ولم نستطع إيجادها في مرجع آخر.

بنفس الطريقة السابقة تم تمثيل هذه العلاقات في مجموعة مخططات مختلفة بحسب شروط التطبيق أي نوع التربة التي يمكن تطبيق العلاقة عليها **وبإستخدام قيم العوامل الناتجة عن الأتربة الأربعة المختارة** في هذا البحث والتي سيرد ذكرها لاحقا:

- العلاقات التي ذكر بأنها لعينات معاد تشكيلها.
- العلاقات التي ذكر بأنها لعينات سليمة.
- العلاقات المتبقية (التي لم يرد في شروطها معلومات عن درجة تخرب العينات).

الرقم	العام	الباحث	العلاقة	نوع التربة	المرجع
1	1944	Skempton	$C_c = 0,007\,(w_L - 10)$	غضار معاد تشكيله	/4/ , /8/ , /11/ , /14/
	1967	Terzaghi and Peck		غضار معاد تشكيله	/1/
2	1944	Skempton	$C_c = 0,007\,(w_L - 7)$	غضار معاد تشكيله الأتربة سليمة البنية الغضار	/2/ , /3/ , /5/ , /25/, /15/ /12/ /13/
3	1944	Skempton	$C_c = 0,009\,(w_L - 10)$	غضار منضغط طبيعيا , غضار سليم البنية متوسط الحساسية	/5/ , /8/ , /19/ , /25/ , /38/ , /44/
	1967	Terzaghi and Peck		غضار منضغط طبيعيا , غضار سليم البنية, متوسط الحساسية	/1/ , /2/ , /3/ , /4/ , /13/ , /14/ , /24/
4	1960	Cozzolino	$C_c = 0,0046\,(w_L - 9)$	غضار مدينة Sao Paulo	/3/ , /13/, /44/
	1976	Azzouz et al		غضار برازيلي	/1/
	-	Bowles		غضار برازيلي	/25/
	1980	Rendon &Herrero		غضار برازيلي	/2/ , /14/
5	1976	Azzouz et al	$C_c = 0,006\,(w_L - 9)$	كل الأتربة الطبيعية	/2/ , /3/ , /44/
6	1976	Azzouz et al	$C_c = 0,004\,(w_L - 9)$	-	/3/
7	1980	Mayne	$C_c = (w_L - 13)/109$	كل أنواع الغضار	/2/, /41/

الجدول (٢-٦-٣) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة

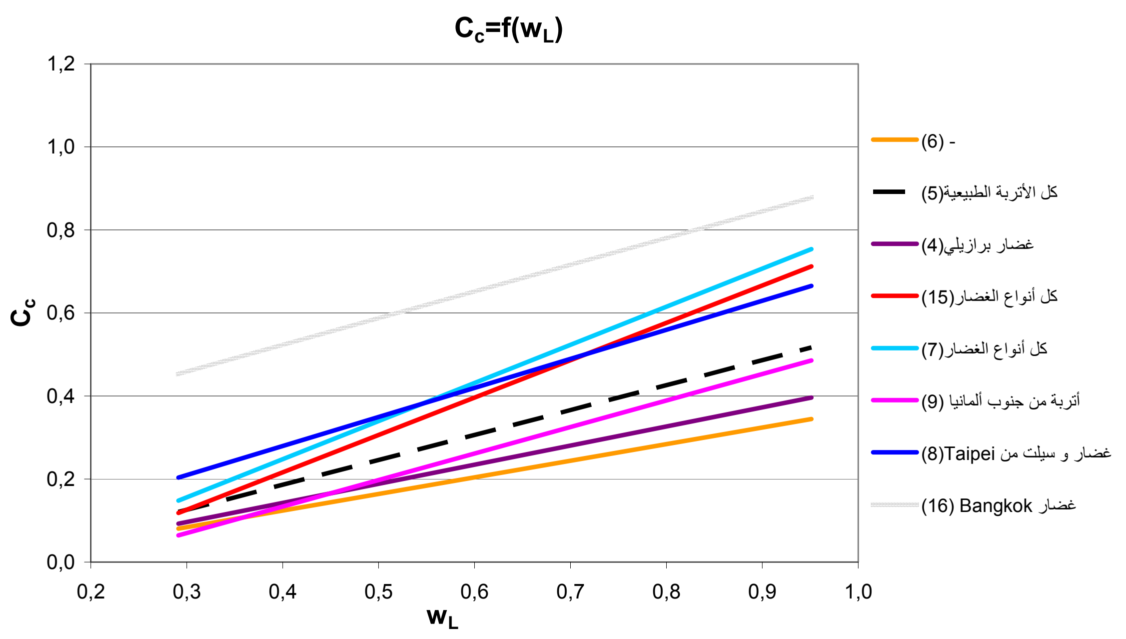
الرقم	العام	الباحث	العلاقة	R^2	نوع التربة	المرجع
8	1990	Moh & Kol	$C_c = 0{,}007\,(w_L - 0{,}07)$		غضار و سيلت من Taipei	/13/
9	1992	Scherzinger	$C_c = 2{,}88 * 10^{-4} * w_L^{1{,}6352}$		أتربة طرية من جنوب ألمانيا	/14/
10	1994	Pestana	$C_c = \frac{a * w_L}{100}\left(1 - \left(\frac{20}{w_L}\right)^2\right)$		كل أنواع الأتربة	/13/
11	2001	Lav & Ansal	$C_c = 0{,}006\,(w_L + 1)$	0,509	سليمة البنية	/3/
12	2001	Lav & Ansal	$C_c = 0{,}007 * w_L - 0{,}029$	0,661	منضغطة طبيعيا	/3/
13	2002	Schulz	$C_c = 0{,}346 * w_L^{0{,}716}$		الأتربة سليمة البنية, للأتربة الطرية حيث $w_0=w_L$	/8/
14	2004	Amit Nath & S.S. DeEalal	$C_c = 0{,}0124 * w_L - 0{,}1762$	0,993	غضار معاد تشكيله برطوبة مساوية لرطوبة حد السيولة	/11/
15	2005	Amir Al-Khafaji	$C_c = 0{,}009\,(w_L - 16)$		كل أنواع الغضار حيث $16 < w_L < 200$	/2/
16	1977	adikari	$C_c = 0{,}21 + 0{,}008\, w_L$		غضار طري من Bangkok	/44/

تتمة الجدول (٢-٦-٣) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة

أغلب العلاقات كانت أيضاً علاقات خطية من الدرجة الأولى لها الشكل التالي (العلاقة ٢-٦-٣) بإستثناء العلاقة (١٠) , حيث (a, b) ثوابت هذه العلاقات و n هي درجة المعادلة.

$$C_c = a * w_L \pm b$$
$$C_C = a * w_L^{\ n} \qquad (٢-٦-٣)$$

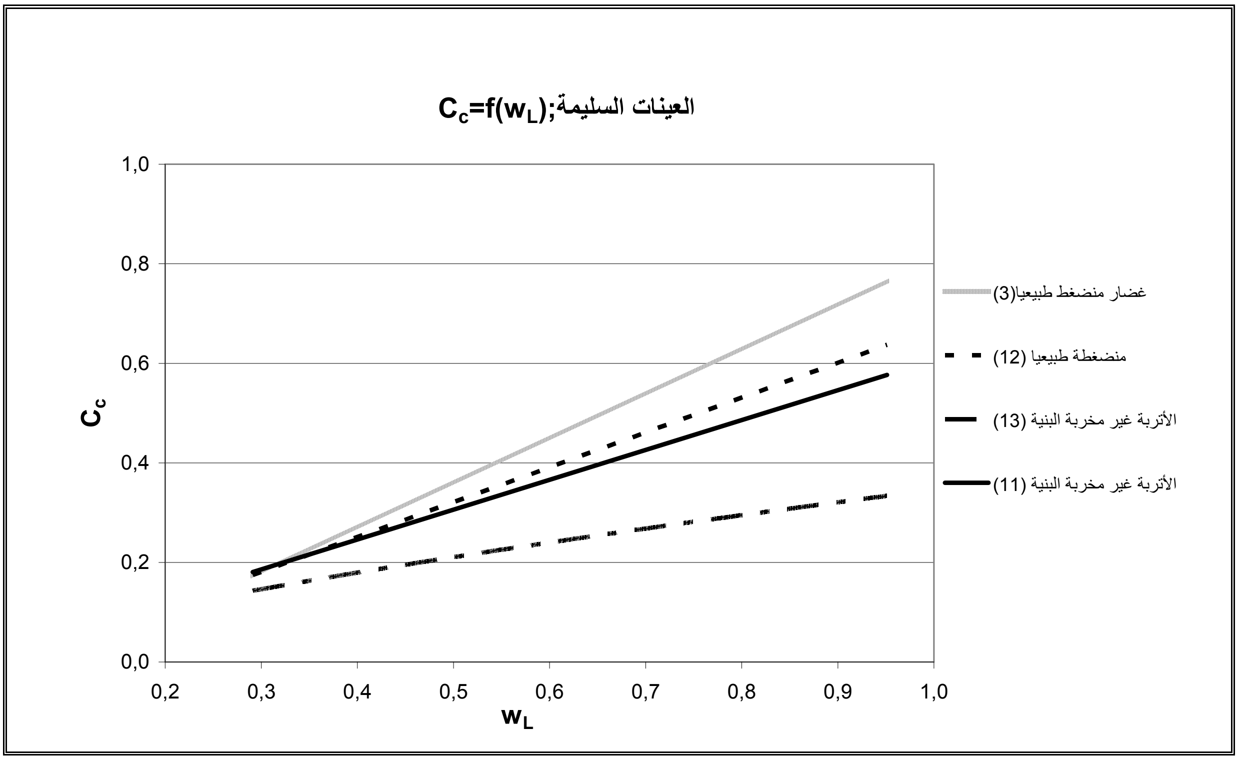
- **العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة** *والتي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات عن درجة تخرب العينات* **(الشكل ٢-٦-٦)**



الشكل (٢-٦-٦) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة
(و التي لم يرد في شروط تطبيقها معلومات عن سلامة العينات)

كما هو واضح في الشكل (٢-٦-٦) فإن المنحنيات تختلف عن بعضها البعض وخصوصا في قيمة الثابت b , في حين أنها تقريباً متوازية أي ميولها الممثلة بالثابت a متساوية تقريباً كما في العلاقات (٤, ٥, ٦, ٨, ١١, ١٦) .

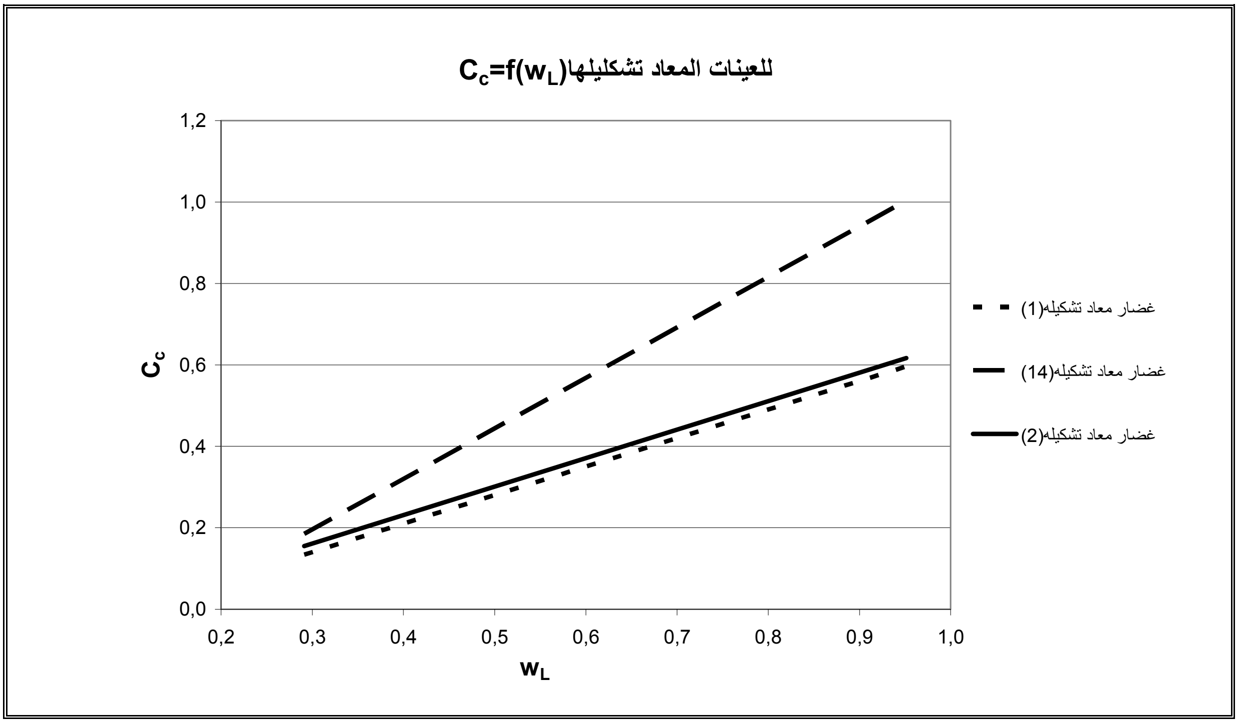
● **العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة** *لعينات غير مخربة (سليمة البنية)* **(الشكل ٢-٦-٧)**



الشكل (٢-٦-٧) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بحد السيولة
(لعينات سليمة البنية)

من الواضح في الشكل (٢-٦-٧) أن التباعد و بالتالي الإختلاف بين العلاقات كبير وخصوصاً في ميولها , في حين أن قيمها متساوية تقريباً عند حد السيولة ٠,٣ أي عندما تصبح الأتربة منخفضة اللدونة, أي يتناسب الفرق في قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقات طرداً مع قيمة حد السيولة للتربة.

العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة *لعينات مشكّلة مخبرياً* **(الشكل ٢-٦-٨)**



الشكل (٢-٦-٨) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بحد السيولة
(لعينات مشكلة مخبريا)

كما ذكر سابقا فإن العلاقتان (١, ٢) للعالم سكيمبتون تختلفان عن بعضهما البعض في قيمة الثابت b بينما هما متساويتان في قيمة الميل a , في حين أن العلاقة ١٤ تختلف عنهما وتعطي قيماً مختلفة لقرينة الإنضغاط , هذا مع أن العلاقات الثلاث هي لغضار معاد تشكيله كما ورد في أغلب المراجع.

☑ ويمكن أن نستنتج عموماً أن التباين بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقات السابقة حتى المتماثلة منها من حيث شروط التطبيق, لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات أخرى غير نوع التربة أو درجة سلامة العينة , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط من رطوبة حد السيولة وحدها بالرغم من تقارب بعض المنحنيات من بعضها البعض هو أمر غير مرض وغير كاف.

٢-٦-٤ العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة I_P

بنفس الطريقة , تم جمع جميع العلاقات التي تمكنّنا من حساب قرينة الإنضغاط كتابع لقرينة اللدونة في المراجع المتوفرة و تم ترتيبها في الجدول (٢-٦-٤) التالي , والذي يوضح وجود ٤ علاقات على الأقل.

من الواضح أن العلاقات قريبة من بعضها البعض بالرغم من إختلاف نوع الأتربة (مشكلة مخبرياً أو لنوع محدد من الغضار من منطقة معينة) و قد تم تمثيل العلاقات في مخطط واحد لبيان التشابه (الشكل ٢-٦-٩).

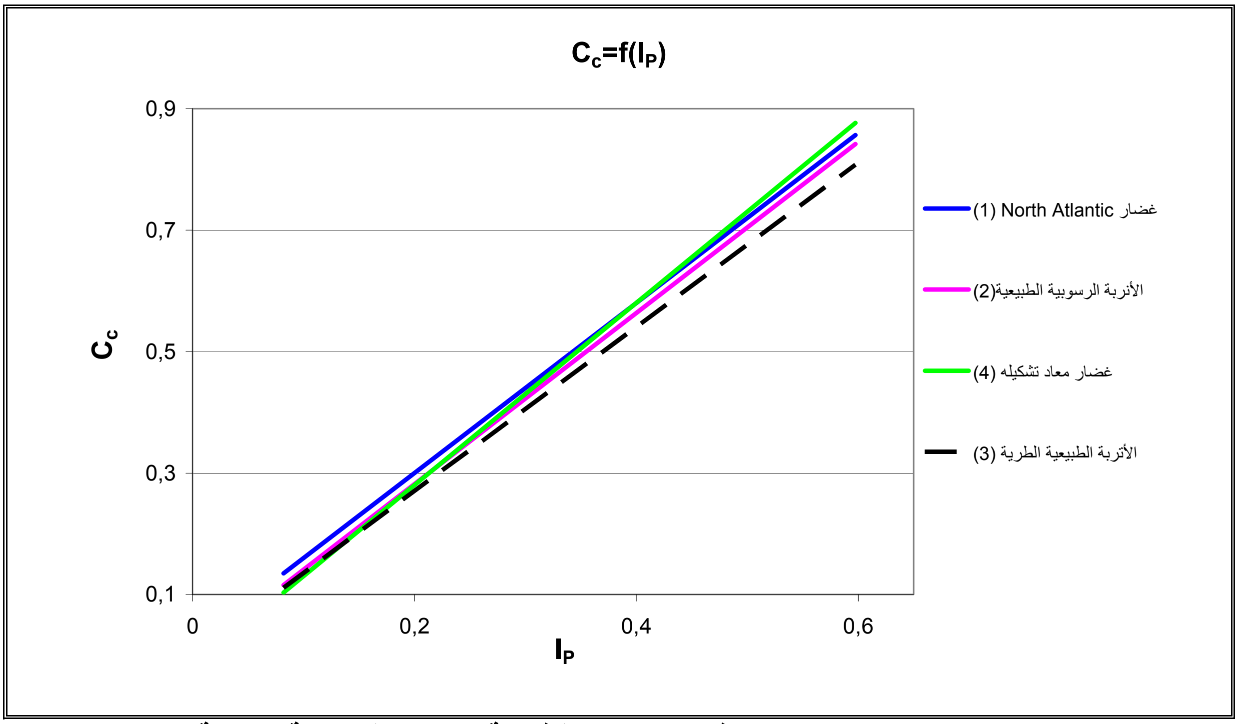
هذه العلاقات كانت أيضاً علاقات خطية من الدرجة الأولى لها الشكل التالي (العلاقة ٢-٦-٤)
حيث (a, b) ثوابت هذه العلاقات :

$$C_c = a*I_P \pm b \qquad (٢-٦-٤)$$

- **العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة** جميع *العلاقات* **(الشكل ٢-٦-٩)**

المرجع	نوع التربة	R^2	العلاقة	الباحث	العام	الرقم
/1/	غضار من North Atlantic	-	$C_c = 0,02 + 0,014 * I_P$	Nacci et al.	1975	1
/9/	للأتربة الرسوبية الطبيعية	0.995	$C_c = I_P / 71$	Wood &worth	1978	2
/9/ , /14/	للأتربة الطبيعية الطرية	0,663	$C_c = I_P / 74$	Kulhawy and mayne	1990	3
/11/	غضار معاد تشكيله برطوبة مساوية لرطوبة حد السيولة	0.996	$C_c = 0,015 * I_P - 0,0198$	Amit Nath & S.S. DeEalal	2004	4

الجدول (٢-٦-٤) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة



الشكل (٢-٦-٩) جميع العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة

على الرغم من إختلاف الفترات الزمنية التي اقترحت فيها هذه العلاقات منذ عام ١٩٧٥ وحتى عام ٢٠٠٤ إلا أنها تتقارب بيانياً من بعضها البعض (a, b متساوية تقريباً في العلاقات الأربعة). ومن الجدير بالذكر هنا أنه يوجد إختلاف في معامل الإرتباط الخطي في العلاقات و إختلاف شروط تطبيقها (نوع التربة). فمعامل الإرتباط الخطي R^2 للعلاقتين (٣, ٢) يقفز من القيمة ٠,٦٦ (في العلاقة ٣ للأتربة الطبيعية الطرية) إلى ٠,٩٩ (في العلاقتين ٢ للأتربة الرسوبية الطبيعية و٤ غضار معاد تشكيله) على الرغم من تشابه العلاقتين , ولعل السبب في ذلك يعود إلى أن معامل الإرتباط الخطي الأعلى يوافق زيادة في تحديد شروط تطبيق العلاقة مثلا غضار معين أو مشكل مخبريا), و بالتالي إن تحديد شروط تطبيق العلاقة المقترحة لتقدير قرينة الإنضغاط بدقة أكبر يرفع من دقة العلاقة.

☑ ويمكن أن نستنتج هنا أن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لقرينة اللدونة هو أمر ربما يكون مرض نوعا ما إلا أنه غير كاف. ولابد من وجود شروط ومؤثرات أخرى تؤثر على قيمة قرينة الإنضغاط.

٢-٦-٥ العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بعوامل خاصة

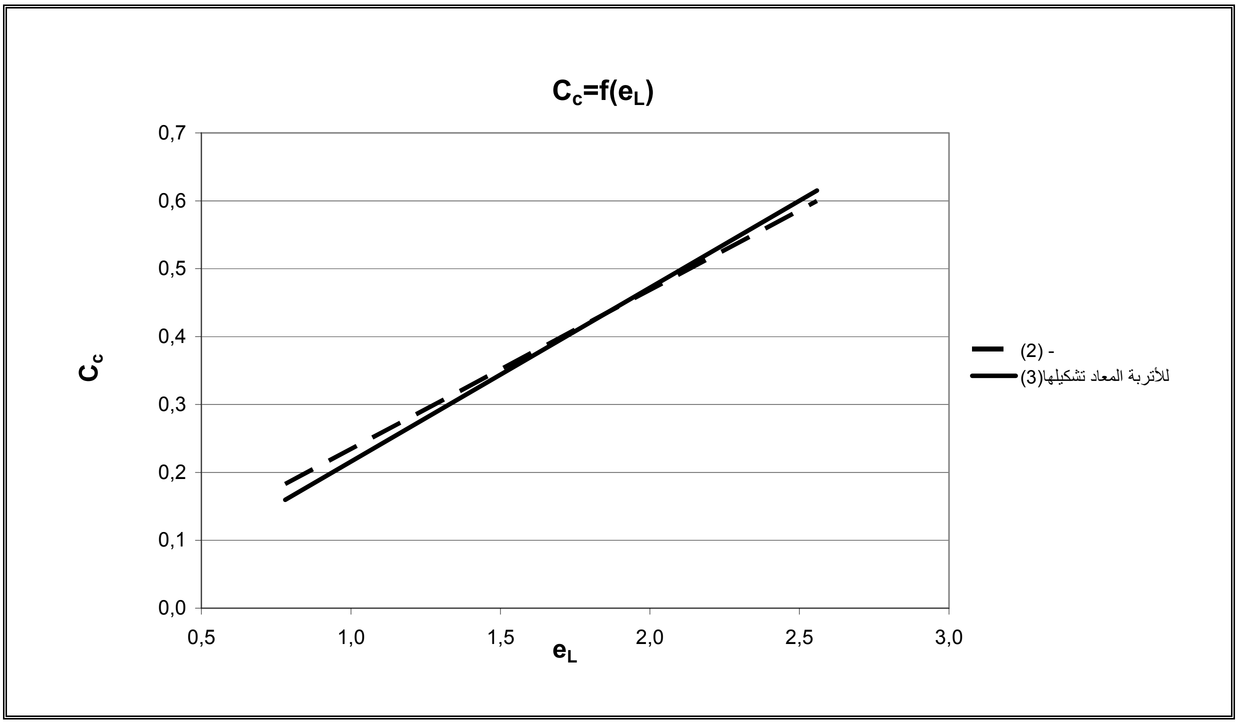
(مثل معامل المسامية عند حد السيولة e_L, المسامية الإبتدائية n_0 , الوزن الحجمي الجاف γ_d)

تم جمع جميع العلاقات التي تمكنّنا من تقدير قرينة الإنضغاط كتابع لبعض المعاملات (المتحولات) الخاصة الغير مألوفة عادة في حساب قرينة الإنضغاط, وتم ترتيبها في الجدول (٢-٦-٥) التالي , والذي يوضح وجود ثلاثة علاقات تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية عند حد السيولة, وعلاقة واحدة بالمسامية الإبتدائية و ثلاثة علاقات بالوزن الحجمي الجاف.

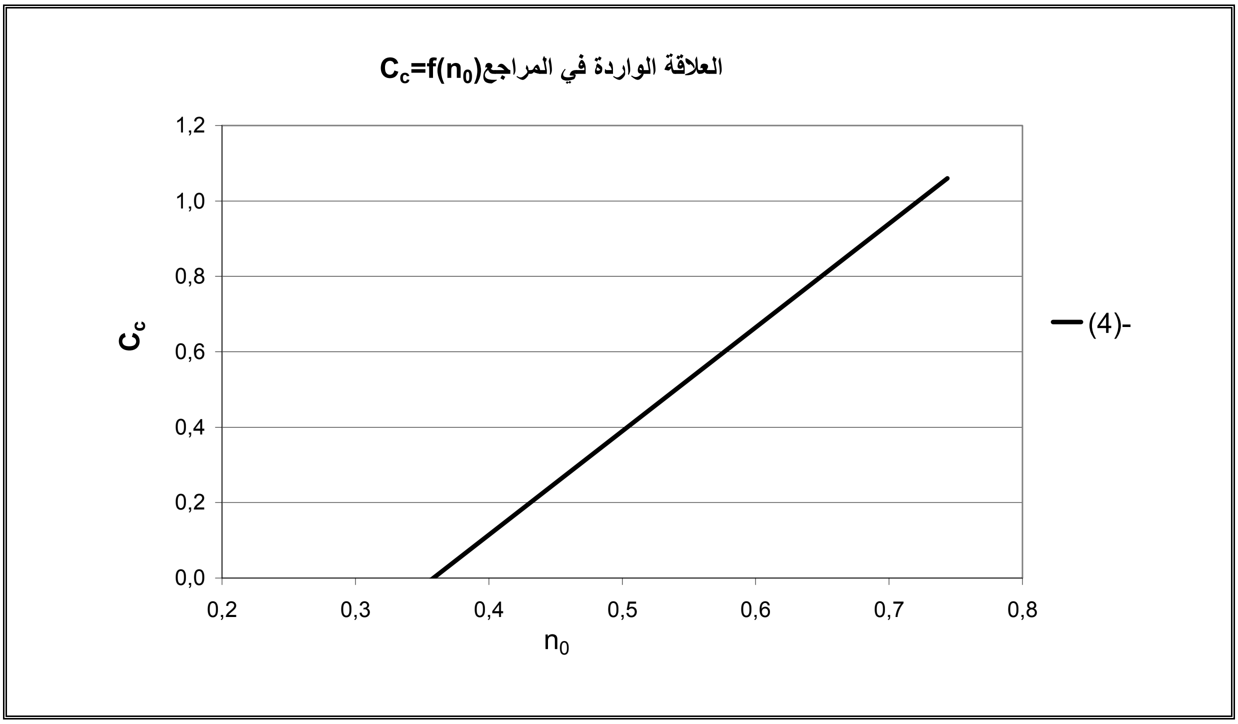
تم تمثيل منحنيات العلاقات في عدد من المخططات لكل عامل على حدا و بحسب نوع التربة التي يمكن تطبيق العلاقة عليها **(الأشكال ٢-٦-١٠ إلى ٢-٦-١٢)** وبإستخدام قيم العوامل الناتجة عن الأتربة الأربعة المختارة في هذا البحث والتي سيرد ذكرها لاحقا.

المرجع	نوع التربة	R^2	العلاقة	الباحث	العام	الرقم
/14/	من أجل مجال تحميل بين 25- 800kPa للأتربة الطبيعية المنضغطة طبيعيا	-	$C_c = 0,0543 * e_L * 10^{(-0,168*\log_{10} P)}$	**Nagaraj**	**1983**	**1**
/4/	-	-	$C_c = 0.2343 * e_L$	**Nagaraj and Murty**	**1985**	**2**
/14/	للأتربة المعاد تشكيلها الواقعة فوق A-line و حيث $25 \leq w_L \leq 60$ أو $0.6 \leq e_L \leq 4.5$	-	$C_c = 0.256 * e_L - 0,04$	**Burland**	**1990**	**3**
/1/	المسامية الإبتدائية n_0	-	$C_c = \dfrac{n_0}{371,747 - 4,275\, n_0}$	**Park and Koumoto**	**2004**	**4**
/14/	كل أنواع الأتربة	-	$C_c = 0,5(\gamma_w / \gamma_d)^{2,4}$	**Oswald**	**1980**	**5**
/3/	الوزن الحجمي الجاف, γ_d سليمة البنية	0,817	$C_c = 0,618 - 0,975 * \gamma_d$	**Lav & Ansal**	**2001**	**6**
/3/	منخفضة اللدونة سليمة البنية	0,812	$C_c = 0,556 - 0,769 * \ln \gamma_d$	**Lav & Ansal**	**2001**	**7**

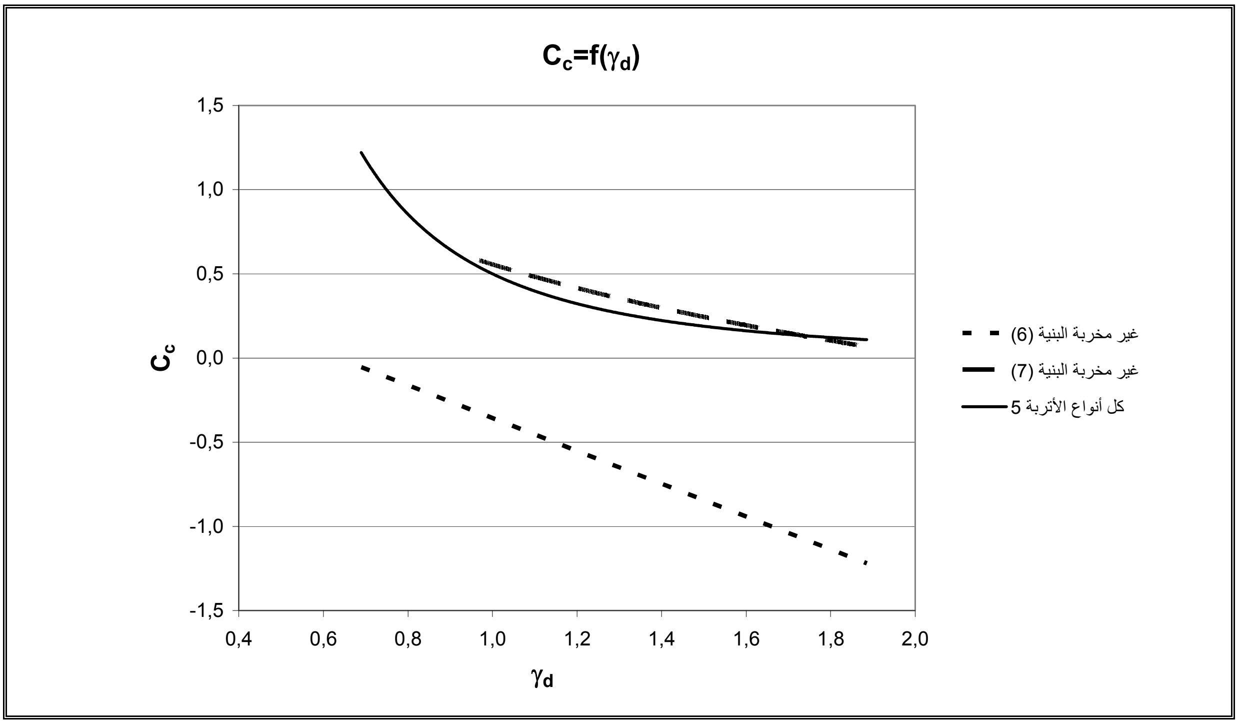
الجدول (٢-٦-٥) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمجموعة من المتغيرات



الشكل (٢-٦-١٠) يوضح العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية عند حد السيولة (علما أن $e_L=G_s*w_L$)



الشكل (٢-٦-١١) العلاقة التي تربط قرينة الإنضغاط بالمسامية الإبتدائية



الشكل (٢-٦-١٢) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالوزن الحجمي الجاف

من الجدول (٢-٦-٥) يمكن أن نلاحظ أنه بالرغم من إختلاف العلاقات عن بعضها البعض إلا أن أغلب المنحنيات الممثلة لها خطية أيضاً متزايدة أو متناقصة حسب المتحول , كما ماهو واضح في الأشكال (٢-٦-١٠ إلى ٢-٦-١٢). ومن الجدير بالذكر أيضاً أن بعض الباحثين يعتبر قيم قرينة الإنضغاط سالبة والبعض الآخر موجبة دون ذكر ذلك صراحة في النص , كما أن بعض العلاقات تعطي قيماً سالبة وموجبة مما يصعب الأمر في التقييم.

☑ ويمكن أن نستنتج هنا أيضاً أن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لهذه المتحولات المذكورة هو أمر غير مرض وغير كاف. ولابد من البحث عن شروط ومؤثرات أخرى تؤثر على قيمة قرينة الإنضغاط وتعبر عنها بشكل أفضل.

٢-٦-٦ العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بأكثر من متغير (متحول)

تم جمع جميع العلاقات التي تمكنّنا من حساب قرينة الإنضغاط كتابع إلى أكثر من متحول معاً مثل معامل المسامية, الرطوبة الطبيعية, حد السيولة, قرينة اللدونة, الوزن النوعي, الوزن الحجمي الجاف, وتم ترتيبها في الجدول (٢-٦-٦) التالي , و هي ٢٣ علاقة جميعها تحوي متحولين ما عدا العلاقة رقم (٤) ففيها ثلاثة متحولات. وكما هو واضح فإن أكثر المتحولات ورودا في الجدول هو معامل المسامية الإبتدائي e_0 ومن ثم الرطوبة الطبيعية ورطوبة حد السيولة كمتحول ثاني .

بنفس الطريقة السابقة تم تمثيل هذه العلاقات في مجموعة مخططات مختلفة بحسب شروط التطبيق و هي نوع التربة التي يمكن تطبيق العلاقة عليها **وبإستخدام قيم العوامل الناتجة عن الأتربة الأربعة المختارة** في هذا البحث والتي سيرد ذكرها لاحقا , وبما أن نتيجة دراسة هذه العلاقات والأشكال أدت إلى نفس الإستنتاجات السابقة أعلاه, لذا سيتم ذكر فقط العلاقات والأشكال التي ذكر بأنها لعينات معاد تشكيلها كما في هذا البحث .

الرقم	العام	الباحث	العلاقة	R^2	نوع التربة	المرجع
1	1976	Azzouz et al	$C_c = 0,37(e_0 + 0,003 * w_L - 0,34)$	0.86	كل الأتربة الطبيعية	/2 /, /4/ , /7/ , /44/
2	1976	Azzouz et al	$C_c = 0,4(e_0 + 0,001 * w_n - 0,25)$	0.85	كل الأتربة الطبيعية	/2/ , /7/, /44/
3	1976	Azzouz , Kriyek & Corotis	$C_c = 0,009 * w_n + 0,002 * w_L - 0,1$		-	/7/
4	1976	Azzouz , Kriyek & Corotis	$C_c = 0,37(e_0 + 0,003 * w_L + 0,0004 * w_n - 0,34)$		غضار من اليونان و من أمريكا	/4/, /7/, /44/
5	1978	worth &wood	$C_c = (I_P * G_s)/2$		لكل أنواع غضار منضغط طبيعيا و معاد تشكيله	/14/
	1983	wood			لكل أنواع غضار منضغط طبيعيا و معاد تشكيله	/14/
	-	Schofield &worth			مخربة	/12/
6	1980	Rendon-Herrero	$C_c = 0,5((1 + e_0) / G_s)^{2,4}$		كل أنواع الغضار	/7/
7	1983	Rendon-Herrero	$C_c = 0.141 * G_s^{1.2} (\frac{1 + e_0}{G_s})^{2.38}$		-	/5/ , /14/, /22/
8	1983	Herreo	$C_c = 0,141 * G_s \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d} \right)^{12/5}$		-	/2/

الجدول (٢-٦-٦) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بأكثر من متحول

الرقم	العام	الباحث	العلاقة	R^2	نوع التربة	المرجع
9	1985	Nagaraj and Murty	$C_c = 0.2343(\frac{w_L(\%)}{100})G_s$	-	كل أنواع الغضار	/5/ , /7/, /22/
10	1985	Koppula	$C_c = 0{,}009 * w_n \pm 0{,}005 * w_L$	-	-	/7/
11	2003	Crumley ,Fernández & Regalado	$C_c = (1+e_0)*(0{,}001 * w_0 + 0{,}114)$	-	أتربة سليمة البنية	/16/
12	2004	Amit Nath & S.S. DeEalal	$C_c = (1+e_0)*(0{,}0021 * w_L + 0{,}0587)$	0.930	أتربة معاد تشكيلها	/11/
13	2004	Amit Nath & S.S. DeEalal	$C_c = (1+e_0)*(0{,}0025 * I_P - 0{,}0866)$	0.942	أتربة معاد تشكيلها	/11/
14	-	Ph.D., P.E. Sayeed Javed,	$C_c = 0{,}0026 * w_L * e_0 + 0{,}092$	-	الأتربة الطبيعية	/7/
15	1977	Adikari	$C_c = 0{,}2 + 0{,}008 * w_L + 0{,}009 e_0$	0,7	غضار طري من Bangkok	/44/
16	1968	cox	$C_c = (1+e_0)*0{,}0043 * w_n$	-	غضار ساحلي من امريكا الجنوبية	/44/
17	1968	cox	$C_c = (1+e_0)*0{,}0045 * w_L$	-	غضار ساحلي من امريكا الجنوبية	/44/
18	1976	Azzouz et al	$C_c = 0{,}003*(1+e_0)*(w_n + 7)$	0,68	غضار طري من Bangkok	/44/

تتمة الجدول (٢-٦-٦) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بأكثر من متحول

الرقم	العام	الباحث	العلاقة	R^2	نوع التربة	المرجع
19	1976	Azzouz et al	$C_c = 0,002 * (1 + e_0) * (w_L + 9)$	0,53	غضار طري من Bangkok	/44/
20	1977	Vidalie	$C_c = (1 + e_0) * 0,0039 * w_n + 0,013$	0,86	غضار فرنسي	/44/
21	1977	Vidalie	$C_c = (1 + e_0) * 0,403 * \log w_n - 0,478$	0,86	غضار فرنسي	/44/
22	-	Balasubramaniam & brenner	$C_c = (1 + e_0) * 0,00566 * w_n - 0,037$	0,81	غضار ساحلي من امريكا الجنوبية	/44/
23	-	Balasubramaniam & brenner	$C_c = (1 + e_0) * 0,0045 * w_L$	0,63	غضار ساحلي من امريكا الجنوبية	/44/

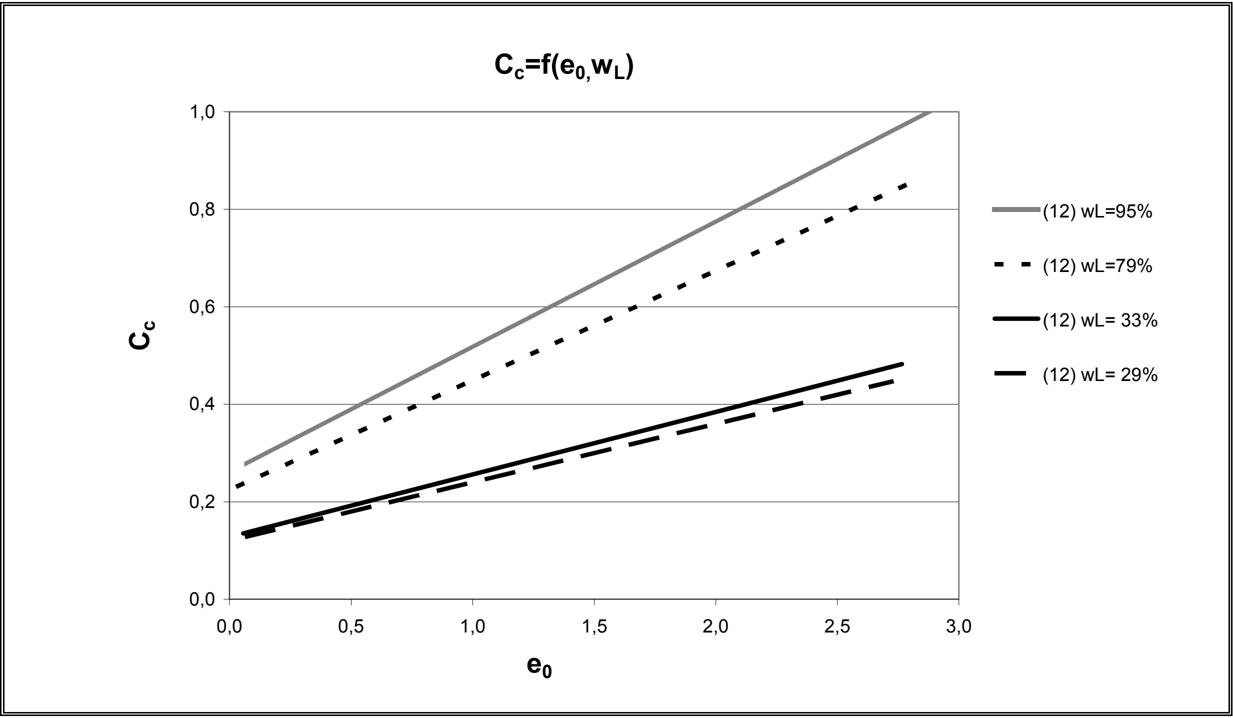
تتمة الجدول (٢-٦-٦) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بأكثر من متحول

كما هو واضح في الجدول (٢-٦-٦) فإن أغلب العلاقات الواردة هي علاقات خطية من الدرجة الأولى بشكل عام , لها الشكل التالي (العلاقة ٢-٦-٥) بإستثناء العلاقات (٦, ٧, ٨) , حيث (a_1, a_2, b) ثوابت هذه العلاقات :

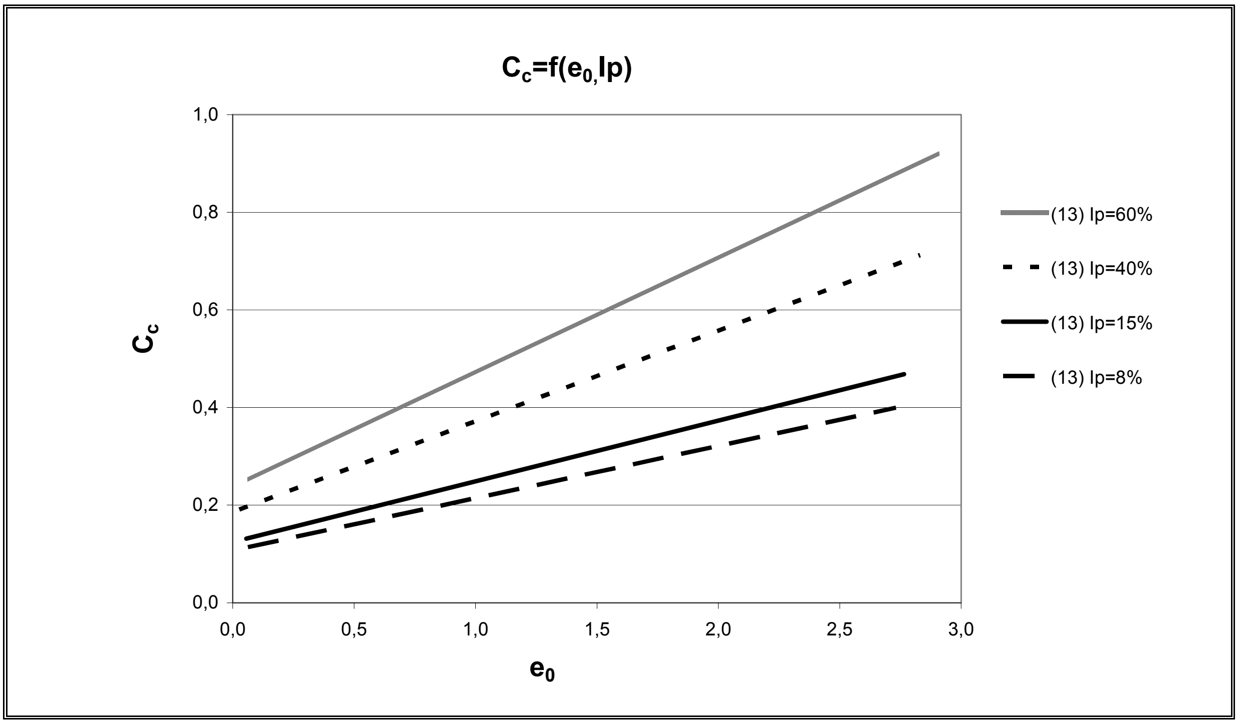
$$C_C = a_1 * x_1 \pm a_2 * x_2 \pm b \qquad (٢-٦-٥)$$

حيث أن: x_1 و x_2 المتحولان , واللذان يمثلان على سبيل المثال معامل المسامية الإبتدائي و الرطوبة الطبيعية أو رطوبة حد السيولة أو أي متحول آخر داخل في العلاقة.

- **العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بأكثر من متغير (متحول)** *لعينات مشكّلة مخبرياً العينات* **(الشكل ٢-٦-١٣)**



الشكل (٢-٦-١٣) العلاقة (١٢) التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي و رطوبة حد السيولة لعينات مشكلة مخبريا



الشكل (٢-٦-١٤) العلاقة (١٣) التي تربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي و قرينة اللدونة لعينات مشكلة مخبريا

في الشكل (٢-٦-١٣) تظهر أربعة توابع خطية مستقيمة تمثل نتائج تطبيق العلاقة (١٢) التي تحسب قيمة قرينة الإنضغاط استناداً إلى المتغيرين e_0 و w_L لأربع أتربة مختلفة من حيث رطوبة حد السيولة. نلاحظ أن التوابع الأربعة تتقارب بنقصان معامل المسامية الإبتدائي , وتزداد قيمة قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقة بزيادة حد السيولة الخاص بالتربة وهو ما يوافق ما ورد سابقاً.

وكذلك الأمر في الشكل (٢-٦-١٤) , حيث تظهر أربعة توابع خطية مستقيمة تمثل نتائج تطبيق العلاقة (١٣) التي تحسب قيمة قرينة الإنضغاط استناداً إلى المتغيرين e_0 و I_P لأربع أتربة مختلفة من حيث قيمة قرينة اللدونة. نلاحظ هنا أيضا أن التوابع الأربعة تتقارب بنقصان معامل المسامية الإبتدائي , وتزداد قيمة قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقة بزيادة قيمة قرينة اللدونة وهو ما يوافق ما ورد سابقاً.

٢-٧ تحليل معطيات الدراسة المرجعية

- ✓ شملت الدراسة مجموعة كبيرة من المراجع والأبحاث و الدراسات المتعلقة بموضوع الإنضغاطية في الأتربة الناعمة و العوامل المؤثرة عليها (بشكل عام) والعلاقات التجريبية المقترحة لتقدير قرينة الإنضغاط و معامل التشوه الخطي (بشكل خاص).

- ✓ وجدت أكثر من ١٠٠ علاقة تجريبية لعدد كبير من العلماء (في أزمنة ودول مختلفة), منذ أبحاث العالم **Skempton** عام ١٩٤٤ /2/, /3/, /4/, /5/, /8/, /11/, /12/, /13/, /14/, /15/, /19/, /25/, /38/ وحتى الأبحاث الحديثة مثل أبحاث **Al-Khafaji** عام ٢٠٠٥ /2/ حيث وردت بعض هذه العلاقات في أكثر من مرجع مع إختلاف اسم العالم أو الباحث أو شروط التطبيق في بعض الأحيان.

- ✓ تختلف العلاقات المقترحة بشكل ملحوظ عن بعضها البعض بالقيم الناتجة عنها و بشكل العلاقة والمتحولات الداخلة فيها.

- ✓ إعتمدت أغلب هذه العلاقات على الخواص الأساسية للتربة (حدود آتربرغ , الرطوبة الطبيعية , معامل المسامية وغيرها) بشكل أساسي لحساب قرينة الإنضغاط وبالتالي معامل التشوه الخطي .

- ✓ في أغلب المراجع لم ينوه أو يجرى أي تصحيح للأخطاء الممكنة و الحاصلة و المتعلقة بالعينات وبالتجربة مثل تخرب العينات ,الجهاز المستخدم و طريقة تنفيذ التجربة ... الخ, والتي يمكن أن تكون ذات تأثير مهم على نتائج الدراسة الناتجة.

- ✓ اعتمد الكثير من الباحثين في دراستهم على نتائج تجارب سابقة دون بيان أو شرح واضح لنوع و لمواصفات الأتربة المستخدمة تصنيفها ونوع العينات المستخدمة و للتجربة وتقنيتها.

- ✓ هناك نقص واضح في المعلومات اللازمة في كثير من الأبحاث مثل نوع التربة ومواصفاتها ودرجة سلامة العينات وغير ذلك و أحيانا كثيرة في دقة العلاقة المذكورة.

٢-٨ النتائج و التوجهات للوصول إلى فكرة البحث

- نتيجة لما ذكر أعلاه تم دراسة هذه العلاقات بشكل مفصل ودقيق وتم تقسيمها حسب العوامل (المتحولات) الداخلة فيها إلى ستة مجموعات و تم تقييم هذه العلاقات ومقارنتها مع بعضها البعض وإيجاد أوجه وأسباب الإختلاف فيما بينها.

- بناء على هذه الدراسة كان لابد من البحث عن معاملات أخرى ناتجة من الخواص الأساسية تُعبّر بشكل أفضل عن العلاقة بين قرينة الإنضغاط أو معامل التشوه والخواص الأساسية للتربة.

- اعتمادا على هذه المعاملات سيتم البحث عن علاقات تجريبية ذات دقة إحصائية مقبولة تربط بين قرينة الإنضغاط وكذلك معامل التشوه الخطي في التربة والخواص الأساسية للتربة , وذلك عن طريق إجراء تجارب الإنضغاطية على بعض الأتربة الناعمة المختلفة الخواص في جهاز الآدومتر.

الفصل الثالث

الدراسة التجريبية



٣- الدراسة العملية (التجريبية)

من أهم أهداف هذا البحث كما ذكر سابقا هو إيجاد علاقات تجريبية ذات دقة إحصائية مقبولة بين الخواص الأساسية للتربة مثل حدود آتربرغ والفعّالية والفعّالية المعدّلة (العلاقة ٣-١ و ٣-٢) و قرينة الإنضغاط و كذلك معامل التشوه الخطي في التربة, عن طريق إجراء تجارب الإنضغاطية على عدة أتربة ناعمة مختلفة الخواص في جهاز الآدومتر , وإستخراج المعاملات اللازمة , وبالتالي كان لابد من إختيار العينات المناسبة التي تحقق هدف البحث و إجراء التجارب اللازمة .

☜ **الفعّالية (سكيمبتون):**

هي نسبة قرينة اللدونة I_p إلى نسبة حبيبات الغضار $F\%$ في عينة ما , أي تعطى بالعلاقة (٣-١):

$$A = I_p / F\%$$
حيث $F:(d \leq 0,002 \text{ mm})$ (٣-١)

☜ **الفعّالية المعدّلة (مارديني) /10/ :**

هي نسبة مربع قرينة اللدونة I_p^2 إلى نسبة حبيبات الغضار و حبيبات السيلت الناعم $F\%$ في عينة ما , أي تعطى بالعلاقة (٣-٢):

$$A_m = I_p^2 / F\%$$
حيث $F:(d \leq 0,0063 \text{ mm})$ (٣-٢)

٣-١ إختيار الأتربة (العينات)

- تم إنتقاء العينات من الأتربة الناعمة المتوفرة والمستخرجة من مواقع مختلفة من الطبقات الترابية التي تعلو بعض مناطق استخراج الفحم الحجري في ألمانيا (خاصة مناطق حدوث الإنهيارات و الإنزلاقات), وتم دراستها وتصنيفها وإختيار الأتربة المناسبة للبحث منها.

- عند إختيار الأتربة المناسبة للبحث , أُخذ بعين الاعتبار أنه لكي نحصل على استنتاجات عامة يتوجب علينا إختيار عدد من الأتربة المختلفة في خواصها , بحيث تحقق نسب مختلفة من:

  - نسبة الحبيبات الناعمة (الغضار و السيلت)
  - حدود آتربرغ
  - الفعّالية
  - الفعّالية المعدّلة
  - بالإضافة إلى خلوها من المادة العضوية

وطبعاً هذا الأمر لم يكن سهلاً بسبب عدد هذه المتغيرات من جهة , وتقارب خواص بعض العينات من بعضها البعض من جهة ثانية , فقد توجب علينا إجراء مجموعة من التجارب الأساسية على جميع العينات المتوفرة أولاً نسبة المحتوى العضوي و التركيب الحبي و حدود آتربرغ. بعد ذلك تمت دراسة النتائج وتقييمها ومن ثم إختيار الأتربة المناسبة للبحث بحيث تحقق المطلوب .

في النهاية تم إختيار أربعة أتربة مناسبة للبحث , ذات نتائج وخواص مختلفة إلى حد ما, بحيث تشمل مجالاً واسعاً للخواص الأساسية المدروسة وخصوصا الفعالية المعدلة, و سيتم لاحقاً ذكر هذه التجارب ونتائجها.

٣-٢ تجارب تعيين الخواص الأساسية

أجريت مجموعة من التجارب المخبرية لتعيين الخواص الأساسية للأتربة الأربعة المختارة في مخبر ميكانيك التربة و الأساسات في كلية الهندسة المدنية في جامعة دريسدن التقنية والتي شملت التجارب التالية (الجدول ٣-٢-١):

	التجربة		النظم المستخدمة (الكود)	شكل توضيحي
١	نسبة المواد العضوية		DIN 18 128	٣-٢-١
٢	الوزن النوعي (طريقة البكنومتر الشعري)		DIN 18 124	٣-٢-٢
٣	الرطوبة		DIN 18 121 T1	
٤	التحليل الحبي المنخلي و الهايدرومتري		DIN 18 123	٣-٢-٣
٥	حدود أتربرغ	حد السيولة (طريقة كازاغراندي)	DIN 18 122 T1	٣-٢-٤
		حد السيولة (طريقة مخروط الإختراق)	DIN ISO/TS 17892-12	
		حد اللدونة	DIN 18 121 T1	

الجدول (٣-٢-١) تجارب الخواص الأساسية



العينات المحضرة للتجربة



وضع العينات في فرن تصل درجة حرارته حتى ٥٥٠°



العينات بعد اخراجها من الفرن

الشكل (٣-٢-١) صور فوتوغرافية أثناء تنفيذ تجربة تعيين المحتوى العضوي



تحضير العينة (تفتيتها)



قياس درجة حرارة الماء في البيكنومتر من أجل تصحيح حساب حجم الماء فيه



غلي البيكنومترات في وعاء التسخين حتى تخرج جميع فقاعات الهواء بين حبات العينة



قياس وزن البيكنومتر مع الماء المقطر والعينة

الشكل (٣-٢-٢) صور فوتوغرافية أثناء تنفيذ تجربة تعيين الوزن النوعي



إزالة جميع الحبات العالقة بالمنخل بواسطة فرشاة خاصة لضمان دقة حساب وزن الحبات المحجوزة



مرحلة النخل من أجل حساب الوزن المحجوز



هز الأنبوب قبل بدء التجربة



وضع الهيدرومتر في الماء المقطر



قياس درجة حرارة الماء من أجل تصحيح الحساب في تجربة الترسيب الحبي

الشكل (٣-٢-٣) صور فوتوغرافية أثناء تنفيذ تجربة الترسيب



مرحلة تحضير العينة



تمرير العينة من المنخل ذو القطر ٠,٤ مم



العينة المنخولة



تجربة حد السيولة



تحديد حد السيولة بطريقة مخروط الاختراق,
عينة جاهزة لوضعها تحت المخروط



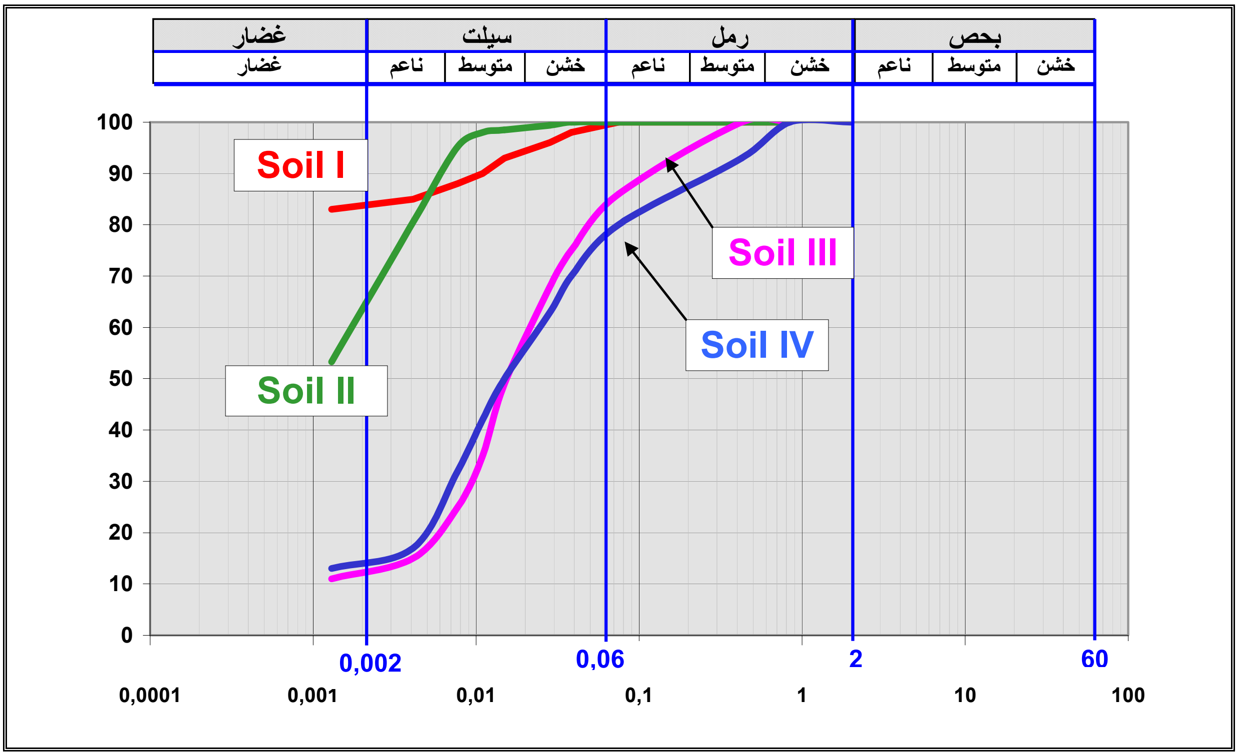
العينة مع تثبيت مخروط الاختراق فوقها

الشكل (٣-٢-٤) صور فوتوغرافية أثناء تنفيذ تجارب حدود أتربرغ

٣-٣ نتائج تجارب تعيين الخواص الأساسية

☜ التركيب الحبي

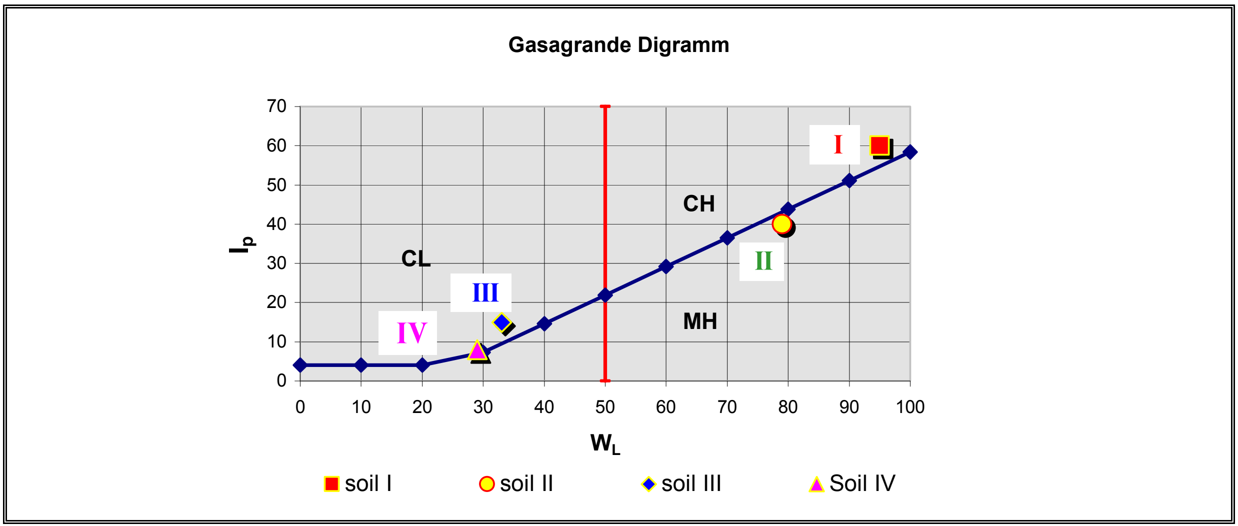
يبين الشكل (٣-٣-١) منحنيات القيم المتوسطة للتركيب الحبي للعينات الأربعة التحليل والترسيب الحبي



الشكل (٣-٣-١) منحنيات التركيب الحبي للأتربة الأربعة

☜ تصنيف الأتربة

يبين الشكل (٣-٣-٢) تصنيف الأتربة الأربعة حسب مخطط كازاغراندي:



الشكل (٣-٣-٢) تصنيف الأتربة الأربعة (حسب كازاغراندي)

☜ ملخص النتائج

يبين الجدول (٣-٣-١) القيم المتوسطة لنتائج التجارب المجراة على الأتربة الأربعة:

التربة	الرمز	الواحدة	I	II	III	IV
الوزن النوعي	γ_s	[kN/m³]	26,90	26,90	26,80	26,80
نسبة الغضار		[%]	82,75	63,00	13,71	14,35
نسبة السيلت		[%]	16,25	37	70,18	64,55
نسبة السيلت الناعم		[%]	5,13	30	7,86	8,05
نسبة الرمل		[%]	1	0	16,11	21,10
حد السيولة	w_L	[-]	0,95	0,79	0,33	0,29
حد اللدونة	w_p	[-]	0,35	0,39	0,18	0,21
قرينة اللدونة	I_p	[-]	0,60	0,40	0,15	0,08
الفعّالية (سكيمبتون)	A	[-]	0,72	0,63	1,09	0,56
الفعّالية المعدّلة	A_m	[-]	0,41	0,17	0,10	0,03
نسبة المواد العضوية		[%]	1,02	0,42	3,22	0,91
تصنيف التربة (كازاغراندي)		-	CH	MH	CL	CL
تصنيف التربة EC7 (الكود الأوروبي)		-	Cl	Cl	clSi	saclSi

الجدول (٣-٣-١) الخواص الأساسية للأتربة (القيم المتوسطة)

٣-٤ تجارب الإنضغاطية

⮊ برنامج التجارب

☜ عينات مخرَبة (مشكلة مخبرياً)

تمت الدراسة في هذا البحث على عينات مخربة ومعاد تشكيلها من أجل التحكم بالشروط الإبتدائية, حيث تنصح كثير من المراجع من أجل البحوث العلمية بإجراء التجارب على أتربة مشكلة مخبريا /37/.

☜ الرطوبات الإبتدائية (غالباً $w_0 \geq w_L$)

تم تشكيل العينات المختلفة (للأتربة الأربعة) برطوبات إبتدائية قريبة من رطوبات حد السيولة (الجدول ٣-٤-١), حيث نفذ عدد مقبول من تجارب الإنضغاطية بإستخدام رطوبتين مختلفتين على الأقل لكل تجربة (كما في التربة الأولى و الثانية و الرابعة) أو أربعة رطوبات مختلفة (من نصف إلى ضعفي حد السيولة تقريباً , كما في التربة الثالثة) لتوضيح تأثير الرطوبة الإبتدائية على قرينة الإنضغاط , وقد اختلف عدد تكرار التجربة لكل رطوبة إبتدائية بحسب الإمكانيات المتاحة (التقنية والزمنية) بحيث لم يقل عن اثنتين استناداً إلى المرجع /40/. وقد إختيرت الرطوبات الإبتدائية ضمن مجال كبير نسبياً من نصف إلى ضعفي حد السيولة تقريباً في التربة الثالثة كمحاولة لرصد مدى تأثير الرطوبة الإبتدائية على قرينة إنضغاط التربة بشكل أفضل.

التربة	I	II	III	IV
الرطوبة الإبتدائية	0,98 – 1,11	0,52 – 0,80	0,16 – 0,66	0,31 – 0,52

الجدول (٣-٤-١) الرطوبات الإبتدائية المستخدمة في التجارب

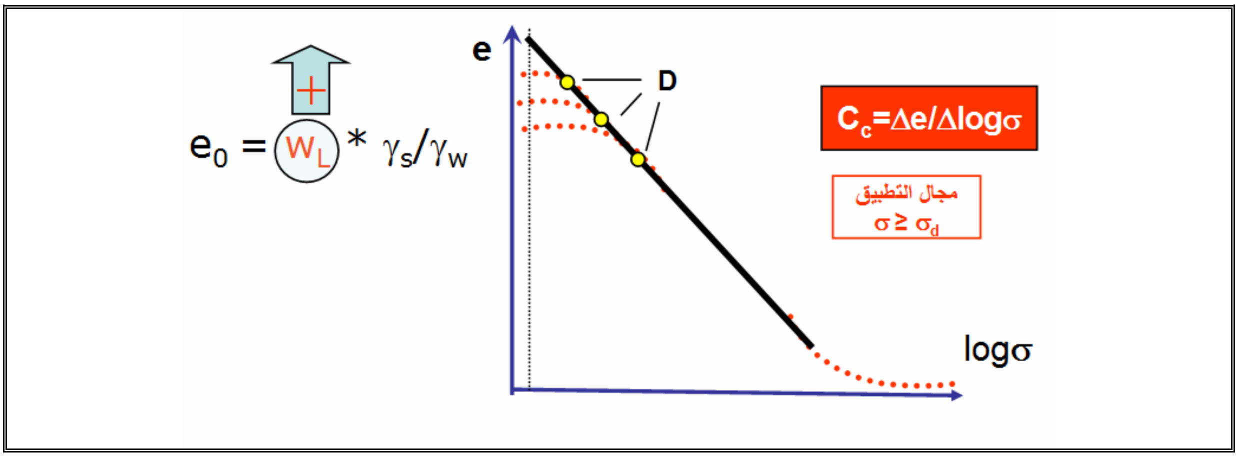
أختيرت الرطوبات الإبتدائية استناداً إلى نصائح المراجع المختلفة , وإلى بعض الخواص التقنية للتجربة:

- ✓ تم تحديد القيمة الدنيا للرطوبة الإبتدائية المستخدمة بنصف رطوبة حد السيولة, لأنه من غير الممكن كما هو معروف وضع عينة مشكلة في حلقة الإنضغاط برطوبة أدنى من ذلك مع ضمان عدم وجود أي فراغات ضمنها , هذا بالإضافة إلى أن الرطوبة المساوية لنصف حد السيولة في الأتربة المختارة تصبح قريبة من رطوبة حد اللدونة حيث تظهر فيها تشققات صغيرة.

- ✓ تم إختيار القيمة العليا للرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد السيولة أو أكبر بالدرجة الأولى استناداً إلى نصائح الباحثين في المراجع المختلفة (مثلا /37/) , وخاصة في الأبحاث المشابهة لبحثنا وإلى بعض الخواص التقنية للتجربة :

– فمثلا العالم سكيمبتون صاحب أول علاقة لتقدير قيمة قرينة الإنضغاط عام ١٩٤٤ قام بإجراء تجارب الإنضغاطية على عينات معاد تشكيلها لأنواع عديدة من الغضار بإعتماد قيمة للرطوبة الإبتدائية مساوية لرطوبة حد السيولة /2/.

– أيضاً الباحثان Koumoto و Otsuka قاما في عام ١٩٩١ بدراسة الإنضغاطية في غضار Ariake وهو غضار ساحلي قابل للإنضغاط رطوبته الطبيعة غالبا أعلى من حد السيولة (معامل السيولة أعلى من ١) /6/.
– وكذلك الأمر بالنسبة للباحث Scherzinger عام ١٩٩١, حيث درس الإنضغاطية في الأتربة الطرية الموجودة في جنوب ألمانيا و هي أيضاً ذات رطوبة أعلى من رطوبة حد السيولة و أوجد مجموعة من العلاقات الهامة /14/
– وفي عام ٢٠٠٢ قام الباحث Schulz بحساب الهبوط في أعمال بناء ميناء في الأتربة الطرية جداً و الواسعة الإنتشار في شمال ألمانيا و أوجد علاقة هامة تربط قرينة الإنضغاط لهذه الأتربة عندما تكون رطوبتها مساوية لرطوبة حد السيولة /8/ و هي العلاقة رقم (١٣) من الجدول (٢-٦-٣) .
– وكذلك في عام ٢٠٠٤ قام Nath و DeDelal بدراسة الإنضغاطية في الأتربة المخلوطة صناعيا عينات مخلوطة من أنواع مختلفة من الغضار مع رمل نهري و بنسب مختلفة, حيث تبدأ رطوبتها الإبتدائية من رطوبة مساوية تقريباً لحد سيولتها. كما ورد في بحثهما نُقلاً عن العالم Seed et al ١٩٦٤ أنه استخدم أتربة مخلوطة كهذه لدراسة الخصائص الأساسية للأتربة /11/.
– كما أن الباحث مارديني في المرجع /21/ درس في عام ١٩٨٩ تأثير سرعة القص على متانة القص على مجموعة من الأتربة برطوبة إبتدائية أعلى من حد السيولة , حيث شملت التجربة في المرحلة الأولى مرحلة ضغط التربة (الإنضغاط).
– من جهة أخرى فإن الرطوبة العالية تقلل الاحتكاك بين العينة و حلقة الإنضغاط و بالتالي تقلل من الخطأ الحسابي الناتج عن ذلك, فقد بينت التجارب أن أكثر من ٢٠% من الحمولة المطبقة على العينة يمكن أن يضيع بسبب الاحتكاك الجانبي الناتج عن التصاق العينة بالحلقة كما ذكر سابقا /37/.
– هذا بالإضافة إلى أن مخطط (منحني) العلاقة بين معامل المسامية والضغوط المطبقة (أنظر الشكل ٢-٣-٥) يتغير بتغير الرطوبة الإبتدائية الممثلة بحد السيولة كما هو موضح أيضاً في الشكل ٣-٤-١ حيث يزداد معامل المسامية الإبتدائي وتقل الإجهادات الممثلة للنقطة **D** بزيادة الرطوبة الإبتدائية, أي يصغر الجزء المنحني من المخطط ويزداد الجزء المستقيم , وبالتالي يكبر مجال تطبيق علاقة حساب قرينة الانضغاط الممثل بميل المستقيم , كما أن طبيعة المقياس اللوغارتمي تحدد مجال التطبيق أي أن مجال تطبيق العلاقة محدد بحدود عليا ودنيا, فمثلا لايمكن أن نحصل على قيمة سالبة لمعامل المسامية عند الضغوط العالية أو أن يسري مفعول العلاقة عندما يتلاشى الضغط المطبق /37/ .



الشكل (٣-٤-١) تأثير الرطوبة الإبتدائية على العلاقة بين معامل المسامية والضغوط المطبقة

تنفيذ التجربة و تعيين معامل التشوه و قرينة الإنضغاط

تم تنفيذ تجارب الإنضغاطية استناداً إلى الكود (DIN 18 135) ,والتي سيتم شرحها بالتفصيل لاحقاً .

الجهاز المستخدم في إجراء التجارب

- المعلومات التقنية لجهاز الآدومتر المستخدم (الجدول ٣-٤-٢ و الشكل٣-٤-٢) :

القوة المحورية الأعظمية:	5 kN
مقياس الهبوط :	12,5 mm ± 0,003 mm
قطر خلية الآدومتر :	50 mm
الارتفاع الأعظمي للخلية:	19,50 mm

الجدول ٣-٤-٢: المعلومات التقنية لأجهزة الآدومتر المستخدمة



الشكل (٣-٤-٢) أجهزة الآدومتر المستخدمة في تجربة الإنضغاطية

يتألف الجهاز من وعاء الإنضغاط مع ملحقاته , صفيحة التحميل العلوية مع حجر مسامي , الحلقة , قطعة الفلتر السفلية , أجهزة تطبيق الحمولة , مقياس الحمولة , مقياس الارتفاع مع حامله , حلقة , و مسطرة للتسوية , كما هو موضح في الشكل (٣-٤-٣).



الشكل (٣-٤-٣) أجزاء جهاز الإنضغاط المستخدم

☜ إجراء التجربة :

١) <u>المرحلة الأولى:</u> تحضير العينة المشكلة مخبريا

تم تحضير العينة استناداً إلى الدليل المخبري /27/ و هو دليل المخبر الذي تمت فيه التجارب , بناء على ذلك يؤخذ جزء من المواد المراد إجراء التجربة عليها و توضع في الماء لمدة ٢٤ ساعة بحيث تكون مغمورة بكاملها و ذلك حتى تتفكك الروابط بين الحبات (الشكل ٣-٤-٤).

بعد ذلك تمرر العينة من المنخل ذو القطر ٢مم (الشكل ٣-٤-٤), للتأكد من التخرب الكامل للعينة و للحصول على قطر الحبات المطلوب حسب الكود المعتمد.
عند إجراء عملية تحضير العينة يتم الإحتفاظ بالحبات المزالة (الحبات الأكبر من ٢مم) نظيفة وجافة كجزء من التوزع (التركيب) الحبي للتربة.



عجن العينة بالماء و نخلها (قطر ٢ مم)



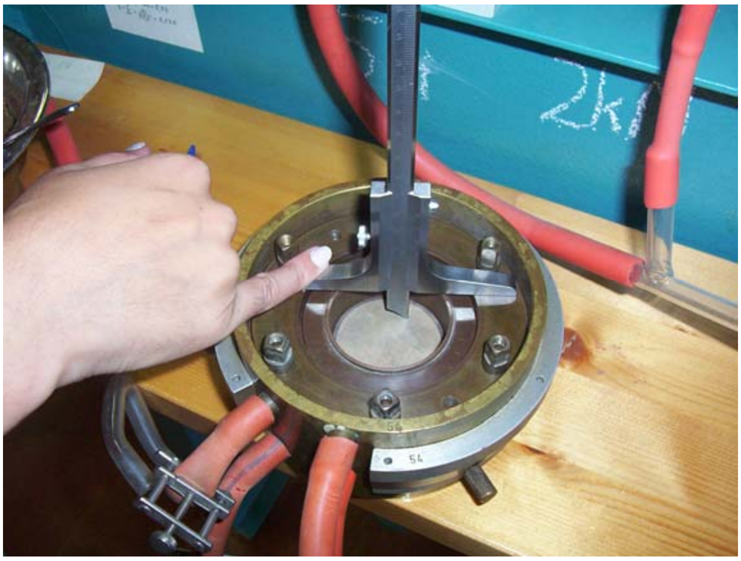
العينة أثناء التحضير والأدوات المستخدمة في تحضيرها

الشكل (٣-٤-٤) تحضير العينة

٢) <u>المرحلة الثانية</u>: وضع العينة في الجهاز

تجهز أجزاء الجهاز قبل وضع العينة في حلقة الإنضغاط حيث يُغلى الحجر المسامي في الماء المقطر لضمان خروج الهواء منه والتأكد من ترطيبه بالماء المقطر قبل وضعه فوق العينة أو تحتها .

يقاس الارتفاع الداخلي لحلقة العينة (الشكل ٣-٤-٥) والذي يمثل ارتفاع العينة الإبتدائي في التجربة, ويحسب وزن العينة.



الشكل (٣-٤-٥) قياس ارتفاع حلقة الإنضغاط

لتحقيق الرطوبة الإبتدائية المطلوبة للتجربة قدر الإمكان , يتم حساب رطوبة العينة بعد الإنتهاء من عملية التحضير مباشرة , وبعدها نضيف كمية الماء الكافية التي تؤمن لنا الرطوبة المطلوبة أو بحيث تسمح لنا بالحصول على أقرب قيمة ممكنة من الرطوبة المطلوبة و هذا ما يسبب زيادة في الوقت اللازم لتحضير العينات .

توضع الحلقة ضمن وعاء الإنضغاط ومن ثم توضع العينة ضمن الحلقة بحرص شديد مع التأكد من عدم بقاء فقاعات هواء داخل الحلقة , ويسوى سطح العينة دون السماح بخروج المادة منها. بعد ذلك تؤخذ كمية من التربة المتبقية لتعيين رطوبة العينة الإبتدائية عليها (الشكل ٣-٤-٦). يبين الشكل ٣-٤-٧ مقطعا تخطيطيا في جهاز الآدومتر مع العينة.



أثناء وضع العينة في وعاء الإنضغاط

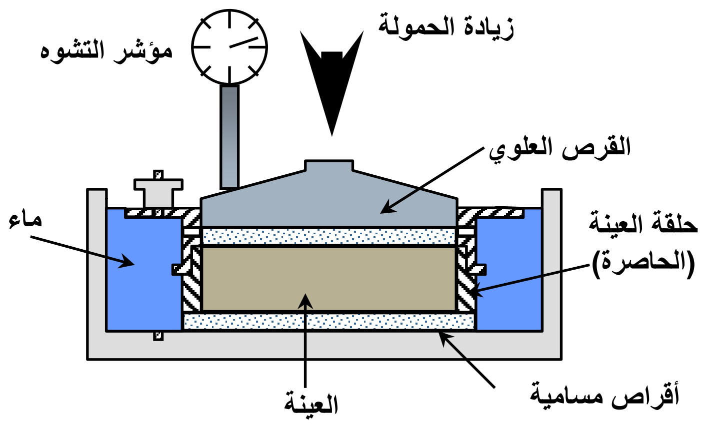


وعاء الإنضغاط قبل وضع العينة



وعاء الإنضغاط بعد وضع العينة

الشكل (٣-٤-٦) وضع العينة في جهاز الآدومتر



الشكل (٣-٤-٧) مقطع تخطيطي في جهاز الآدومتر مع العينة

ولابد من الذكر هنا أن عملية وضع العينة في الحلقة لم يكن امرا سهلا كما يبدو , ففي الكثير من التجارب وبسبب الرطوبة الإبتدائية المرتفعة, كان لابد من العمل بدقة وببطء في محاولة لوضع العينة في حلقة الإنضغاط دون تسربها (خروجها) خارج الحلقة , كما أن بعض العينات كما في التربة الأولى , كانت تلتصق بشدة على جوانب حلقة الضغط مما يجعل مهمة وضع تربة العينة في حلقة الإنضغاط دون تواجد فراغات فيها أكثر صعوبة.

٣) <u>المرحلة الثالثة</u>: تهيئة الوضع الإبتدائي للتجربة

توضع صفيحة التحميل العلوية مع القرص المسامي فوق العينة بدون أي ضغط (بعد فصل العينة عن القرص المسامي بورق فلتر رطبة لمنع جفاف العينة و لمنع دخول حبات العينة ضمن القرص المسامي) ويثبت ذراع التحميل , و يضبط مقياس الهبوط على الصفر قبل تطبيق أي حمولة كما هو مبين في الشكل ٣-٤-٨ ,وذلك بعناية شديدة, و من ثم تبدأ بعدها مرحلة التحميل ببطئ وإبتداءا من حمولات صغيرة.



تثبيت ذراع التحميل فوق وعاء الإنضغاط



ضبط مقياس الهبوط



العينة جاهزة لتطبيق الحمولة عليها

الشكل (٣-٤-٨) تهيئة الوضع الإبتدائي للتجربة

٤) <u>المرحلة الرابعة</u>: مرحلة إجراء التجربة (التحميل)

تعتمد قيمة الحمولة الأولى المطبقة على الرطوبة الإبتدائية للعينة, ففي بعض العينات و بسبب الرطوبة الإبتدائية المرتفعة, كان لابد من البدء بحمولات صغيرة (حوالي ٢,٥ كيلونيوتن بالمترالمربع) وذلك حتى لا تخرج المادة من حلقة الإنضغاط و بعد ذلك ترفع الحمولة تدريجيا بمقدار الضعف أو أقل في كل خطوة تحميل (١٠- ١٧- ٢٥ - ٥٠ - ١٠٠- ٢٠٠- ٥٠٠- ٨٠٠- ١٢٠٠- ١٧٠٠- ٢٠٠٠ كيلونيوتن بالمتر المربع) , بحيث تنتهي كل خطوة من خطوات التحميل مع إنتهاء مرحلة الهبوط الأولي الذي يراقب من مخطط الهبوط مع الزمن على شاشة الحاسب. وقد تم التحميل في التربة الأولى إلى الحمولة ١٥٠٠كيلونيوتن بالمتر المربع , و في التربتين الثانية و الثالثة إلى الحمولة ١٠٠٠ كيلونيوتن بالمتر المربع, بينما وصلت الحمولة في التربة الرابعة إلى ٢٠٠٠ كيلونيوتن بالمتر المربع. يبين الشكل **٣-٤-٩** كيفية وضع الحمولات على ذراع التحميل.

ولابد أيضاً من الذكر هنا أن هذه المرحلة كانت صعبة ودقيقة جداً فإن أي ميول في صفيحة التحميل كان يؤدي في أغلب الأحيان إلى فشل التجربة وبالتالي إعادتها , بسبب خروج المادة من حلقة الإنضغاط , والذي يؤدي إلى هبوطات كبيرة غير صحيحة .

يتم وضع الماء حول العينة مباشرة بعد أول مرحلة تحميل و ذلك لمنع جفاف العينة , باعتبار أن زمن إجراء التجربة طويل نسبياً , حيث بلغ الزمن في بعض التجارب أسبوعين ووصل في بعضها الآخر إلى شهرين تقريباً كما في التربة الأولى.



الشكل (٣-٤-٩) وضع الحمولات على ذراع التحميل

☜ مخطط الهبوط مع الزمن :

يتم قراءة مقياس الارتفاع (الهبوط) إبتداءاً من اللحظة التي يتم فيها وضع الحمل, في الأزمنة التالية بالدقيقة (0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30 min) و من ثم بالساعة (1, 2, 4, 8 ,24h) , عن طريق الحاسب الألكتروني (الموصول مع أجهزة الآدومتر) , حيث يظهر لنا على الشاشة منحني الهبوط مع الزمن بحيث يمكن مراقبته لضمان إنتهاء الهبوط الأولي و بالتالي إنتهاء خطوة التحميل الحالية, و إمكانية تطبيق الحمولة الأعلى.

من صعوبات هذه المرحلة أيضاً هي قياس الهبوط الفعلي ففي بعض الأحيان كان ذراع التحميل يمس حلقة الإنضغاط مما يؤدي إلى توقف الهبوط بسبب إنتقال الحمولة إلى وعاء الإنضغاط و ليس إلى العينة , مما يضطرنا إلى استبعاد التجربة بأكملها.

٥) المرحلة الخامسة: الإنتهاء من التجربة وإخراج العينة

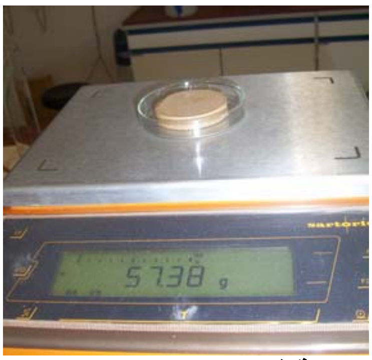
في المرحلة الأخيرة من عملية الإنضغاط , تؤخذ القراءة الأخيرة لمقياس الهبوط وتزال بعدها الحمولة ومن ثم ذراع التحميل. بعدئذ تخرج الحلقة مع العينة , ثم تقشط الطبقة الخارجية المحيطة بالعينة بسماكة ١ مم وذلك لضمان التخلص من الجزء الرطب الناتج عن الماء المحيط بالعينة في وعاء الإنضغاط, وتجرى بعدها تجربة الرطوبة على العينة المقشوطة لتعيين رطوبتها النهائية (الشكل ٣-٤-١٠).



العينة بعد إنتهاء التجربة وقد التصقت بالحجرين المساميين العلوي و السفلي



العينة بعد قشطها من الأطراف موضوعة في وعاء من أجل حساب رطوبتها



حساب الرطوبة (وزن العينة قبل و بعد تجفيفها على ميزان الكتروني دقيق)

الشكل (٣-٤-١٠) إخراج العينة وحساب الرطوبة النهائية

تقيم النتائج عادة باستخدام برنامج GGU , ولكن من أجل إظهار النتائج في هذا العمل فقد أُخذت النتائج من الحاسب الإلكتروني الموصول بجهاز الآدومتر , وأدخلت وعولجت في برنامج Excel أيضاً.

الفصل الرابع
نتائج الدراسة التجريبية



٤- نتائج الدراسة التجريبية

٤-١ عرض نتائج التجارب

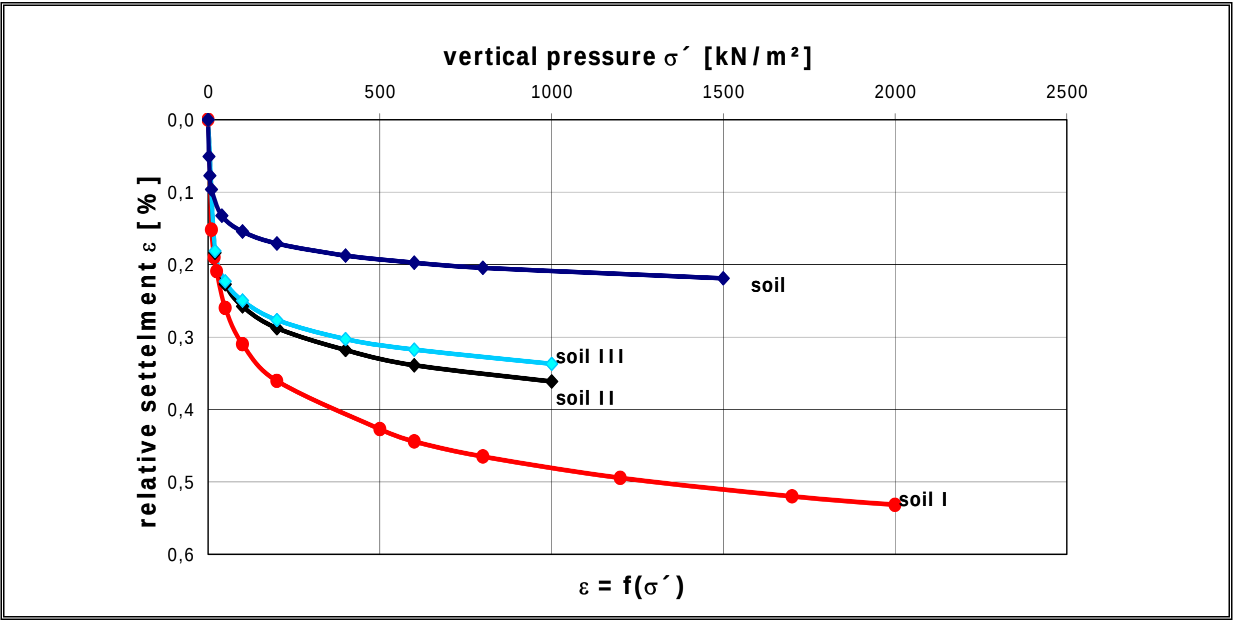
نورد فيما يلي العلاقات المستخدمة في عرض النتائج ومعالجتها وتقييمها لجميع التجارب المجراة على عينات الأتربة الأربعة:

- العلاقة بين التشوه النسبي ε و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $\varepsilon = f(\sigma')$
- العلاقة بين التشوه النسبي ε و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $\varepsilon = f(\log\sigma')$
- العلاقة بين معامل المسامية **e** و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $e = f(\sigma')$
- العلاقة بين معامل المسامية **e** و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $e = f(\log\sigma')$
- العلاقة بين قرينة الإنضغاط C_c و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $C_c = f(\log\sigma')$ ، $C_c = f(\ln\sigma')$
- العلاقة بين معامل التشوه E_{oed} و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $E_{oed} = f(\sigma')$
- العلاقة بين معامل التشوه E_{oed} و الضغط الفعّال المطبق ´σ — $\log E_{oed} = f(\log\sigma')$

٤-١-١ العلاقة بين التشوه (الهبوط) النسبي و الضغط الفعّال المطبق $\varepsilon = f(\sigma')$ بالإحداثيات العادية

- من أجل معالجة وتقييم النتائج تم تمثيل العلاقة بين التشوهات (الهبوطات) النسبية و الضغوط الفعّالة المطبقة لجميع التجارب المجراة بشكل بياني, ويبين الشكل ٤-١-١ مثالا توضيحيا لنتائج تجارب الأتربة الأربعة (الأمثلة مأخوذة لأربع عينات رطوبتها تساوي رطوبة حد السيولة حتى نتمكن من المقارنة فيما بينها) ,حيث يتضح من هذا التمثيل الإختلاف الواضح في تصرف المادة (التربة ١ و٤ مثلا) أو التقارب فيها (التربة ٢ و٣) من جهة التشوهات والإجهادات وخاصة القيم الأعظمية للهبوطات النسبية في كل تربة.

☑ بمقارنة هذه النتائج مع خواص الأتربة الأربعة (الجدول ٣-٣-١) يمكن أن نستنتج عموماً أن أفضل المعاملات التي يمكن أن تصف هذا التباين بين القيم الناتجة أو التقارب بينها هو الفعّالية المعدّلة و قرينة اللدونة وحد السيولة بدرجات مختلفة , أما المعاملات والنسب الأخرى كنسبة الغضار أو حد اللدونة أو الفعّالية حسب سكيمبتون فلا يمكن أن تفسر لوحدها هذا التباين أو التقارب بقيم التشوهات النسبية للتربة (أي إنضغاطيتها) , وهذه نتيجة هامة جداً كما سنرى في مجرى هذا البحث .

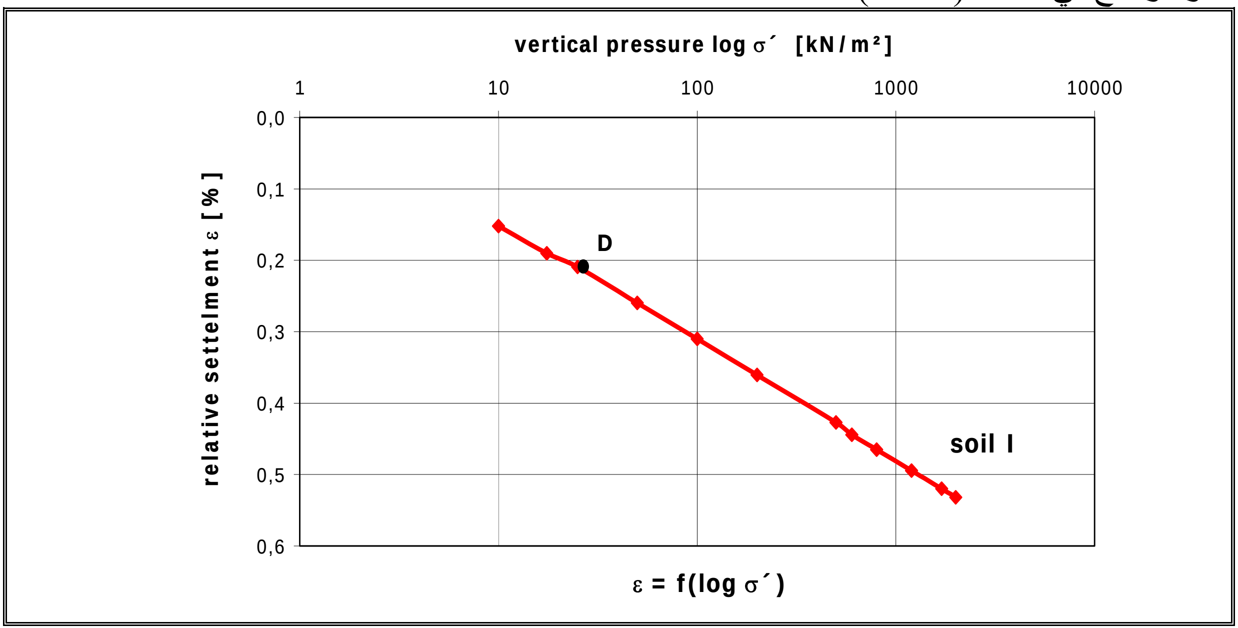


الشكل (٤-١-١) مثال عن نتائج العلاقات بين التشوهات النسبية و الضغوط **الفعّالة للأترية الأربعة**

٤-١-٢ العلاقة بين التشوه (الهبوط) النسبي و الضغط الفعّال المطبق بالإحداثيات النصف لوغارتمية

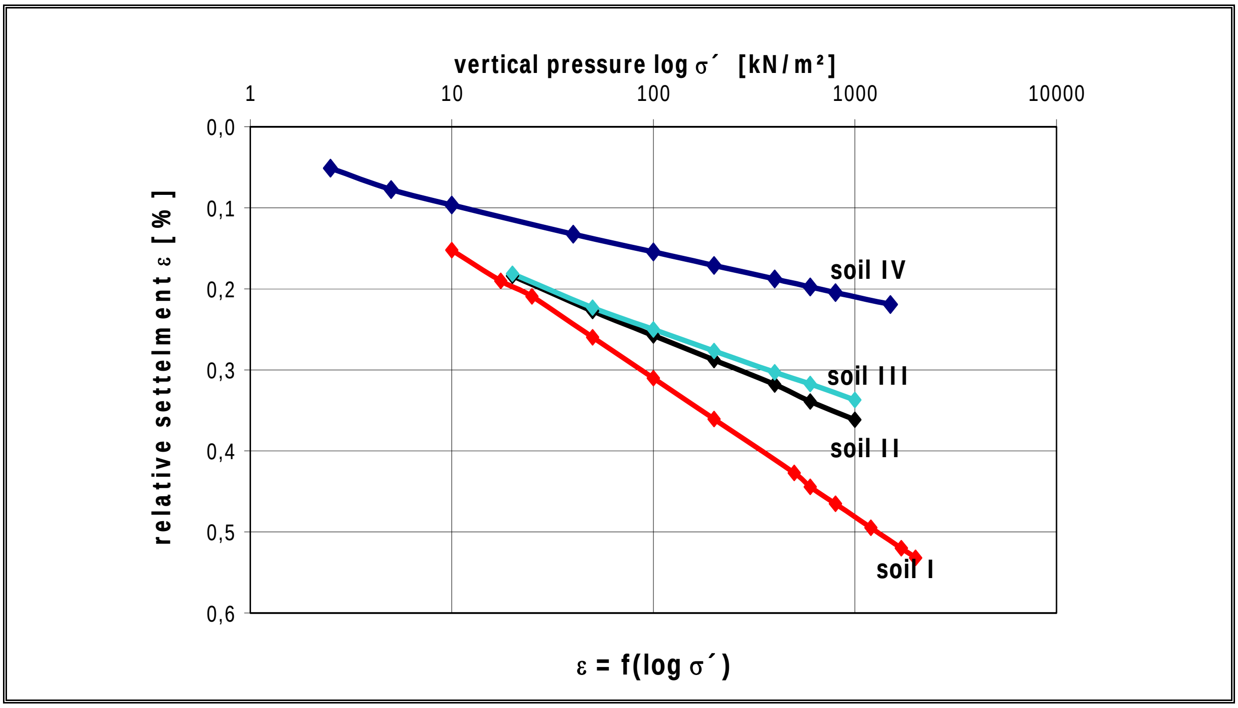
$$\varepsilon = f(\log\sigma')$$

تم رسم العلاقة بين التشوهات النسبية والضغوط الفعّالة المطبقة بشكل نصف لوغارتمي أيضاً كما هو مألوف (الأمثلة مأخوذة للعينات الأربع السابقة و التي رطوبتها تساوي رطوبة حد السيولة حتى نتمكن من المقارنة فيما بينها), حتى نتمكن من معرفة النقطة التي يبدأ فيها المنحني بالإنعطاف ليصبح مستقيما, و بالتالي تكون هذه النقطة هي بداية المجال الذي يمكن تطبيق علاقات حساب قرينة الإنضغاط و معامل التشوه فيه (النقطة D) , وكذلك من أجل معرفة التغيرات في مجال الإجهادات الصغيرة بدقة أكبر , كما هو موضح في الشكل (٤-١-٢).



الشكل (٤-١-٢) العلاقة بين التشوهات النسبية و الضغوط الفعّالة (مقياس نصف لوغارتمي)

ويبين الشكل (٤-١-٣) مثالا توضيحيا عن نتائج التجارب للأترية الأربعة (الأمثلة مأخوذة للعينات الأربع السابقة) , وهي تمثل بشكل أساسي مستقيمات مختلفة الميول حسب نوع التربة ومجال الضغوط المطبقة , ويمكن أن نصل بسهولة إلى نفس الإستنتاج من الفقرة السابقة بما يخص التباين أو التقارب بالقيم.

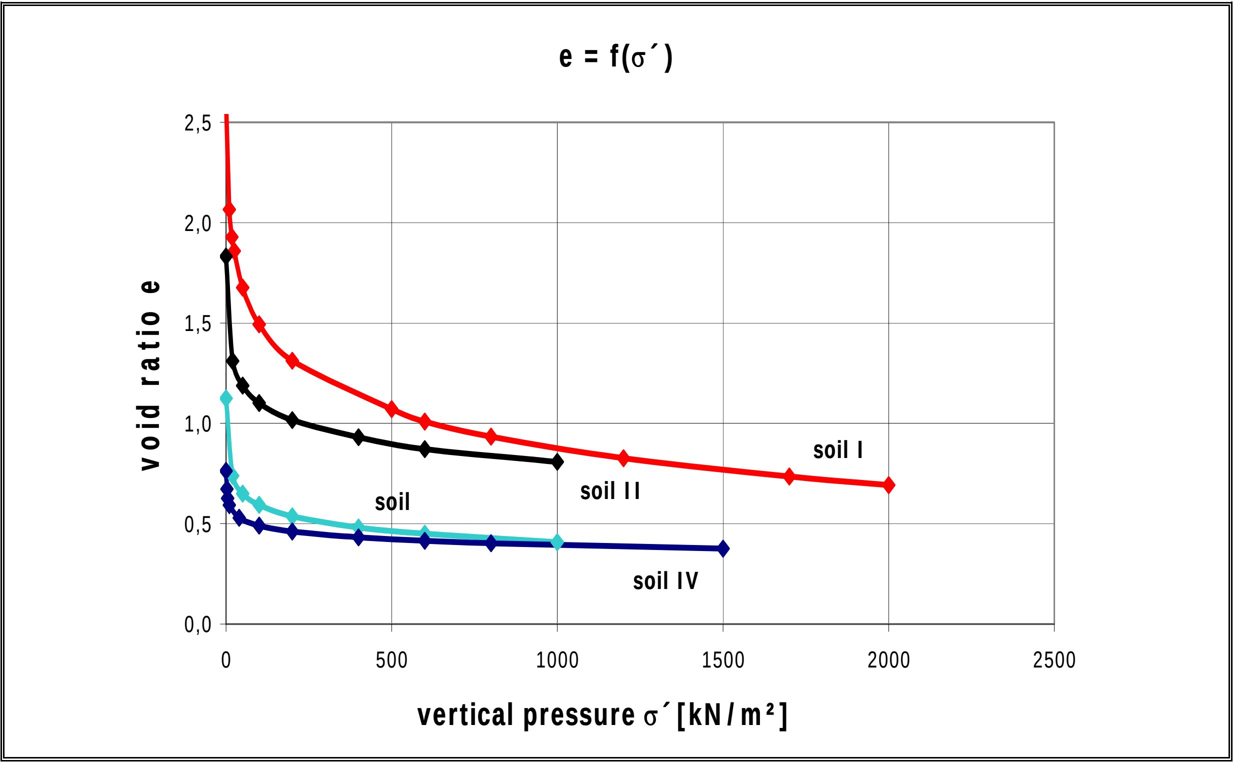


الشكل (٤-١-٣) مثال عن نتائج العلاقات بين التشوهات النسبية و الضغوط الفعّالة للأترية الأربعة

٤-١-٣ العلاقة بين معامل المسامية و الضغط الفعّال المطبق بالإحداثيات العادية

$$e = f(\sigma')$$

يبين الشكل (٤-١-٤) مثالا توضيحيا عن نتائج العلاقة بين معامل المسامية والضغط الفعّال للأترية الأربعة (الأمثلة مأخوذة للعينات الأربع السابقة) الطريقة المقترحة من العالم ترزاكي والمستخدمة في أغلب الدول , حيث يظهر أيضاً التباين في النتائج , حيث يمكن توضيحه أكثر من خلال الفقرة التالية العلاقة بين معامل المسامية و الضغط الفعّال المطبق بمقياس نصف لوغارتمي



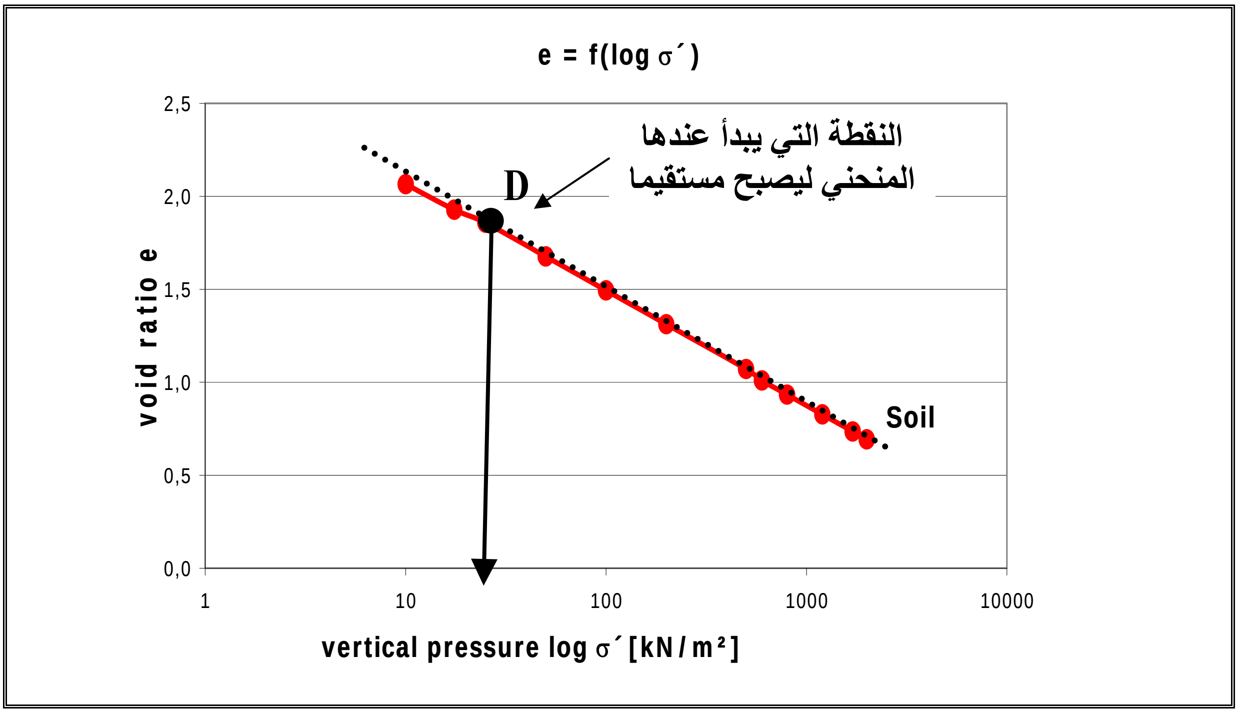
الشكل (٤-١-٤) مثال عن نتائج العلاقات بين معاملات المسامية والضغوط الفعّالة للأترية الأربعة

٤-١-٤ العلاقة بين معامل المسامية و الضغط الفعّال المطبق بالإحداثيات النصف لوغارتمية

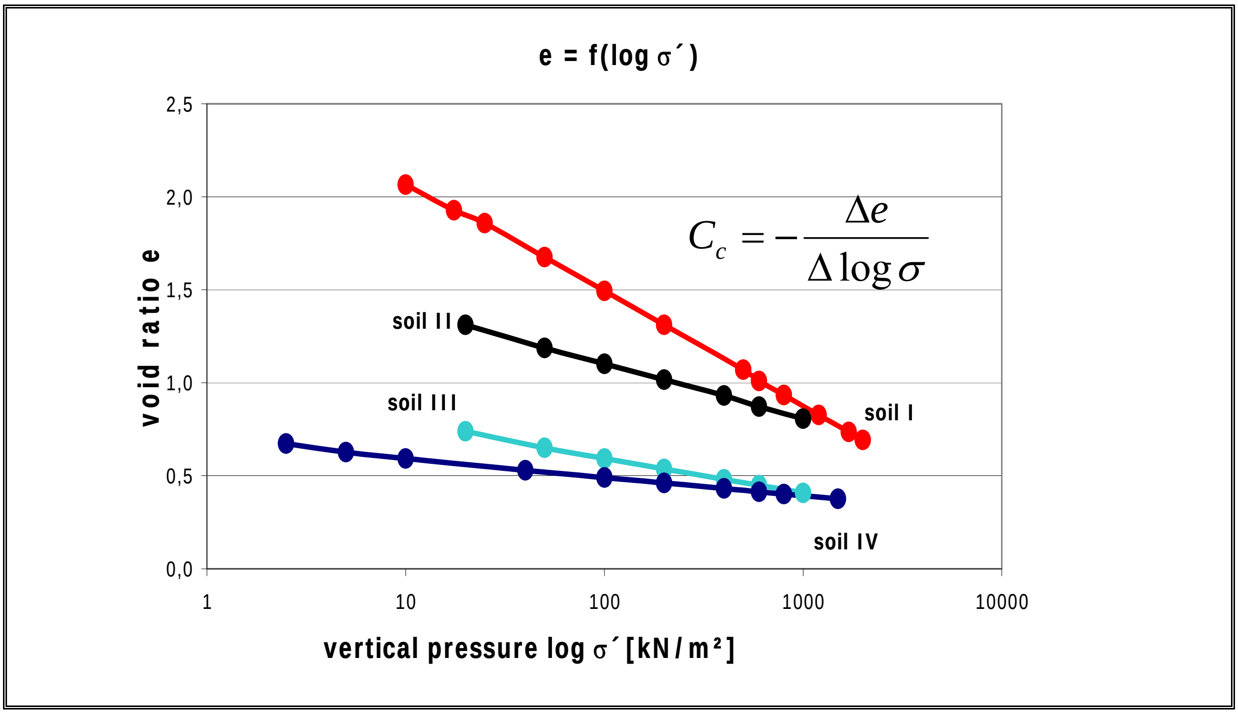
$$e = f(\log\sigma')$$

تمكننا هذه العلاقة بين معامل المسامية و الضغط الفعّال المطبق والتمثيل النصف اللوغارتمي لها, في تعيين قرينة الإنضغاط (المعامل الأساسي في هذا البحث) وفي تحديد قيمة الضغط الأصغري لمجال صلاحية تطبيق العلاقة (النقطة D) , و هو الضغط الموافق للنقطة التي يبدأ عندها المنحني ليصبح مستقيما , ويبين الشكل (٤-١-٥) مثالا عن تحديد الضغط الفعّال الموافق للنقطة D (أنظر أيضا الشكل ٤-١-٧) ومقداره هنا ٢٥ كيلونيوتن بالمتر المربع (التجربة الأولى من التربة الأولى) , وهي قيمة تختلف من تجربة إلى أخرى و من تربة إلى أخرى , وهي لاتمثل في تجاربنا الإجهادات المسبقة (أتربة مشكلة مخبريا) وإنما ناتجة عن الأخطاء الممكنة وعن حساسية المادة عالية الرطوبة في بداية التجربة وعند الحمولات الصغيرة, حيث تعين قرينة الإنضغاط ضمن مجال الصلاحية من العلاقة ٢-٣-٥ كما ذكر سابقا.

يبين الشكل ٤-١-٦ مثالا توضيحيا عن نتائج العلاقة بين معامل المسامية والضغط الفعّال المطبق للأترية الأربعة , حيث يبين التباين الواضح والمعروف في تصرف المادة من تربة إلى أخرى وكذلك التباين في مجال تطبيق العلاقة لحساب قرينة الإنضغاط , ويمكن أن نصل بسهولة إلى نفس الإستنتاج السابق (بما يخص التباين أو التقارب بالقيم).



الشكل (٤-١-٥) مثال من التربة ١ للعلاقة بين معامل المسامية و الضغط الفعّال (تحديد النقطة D)

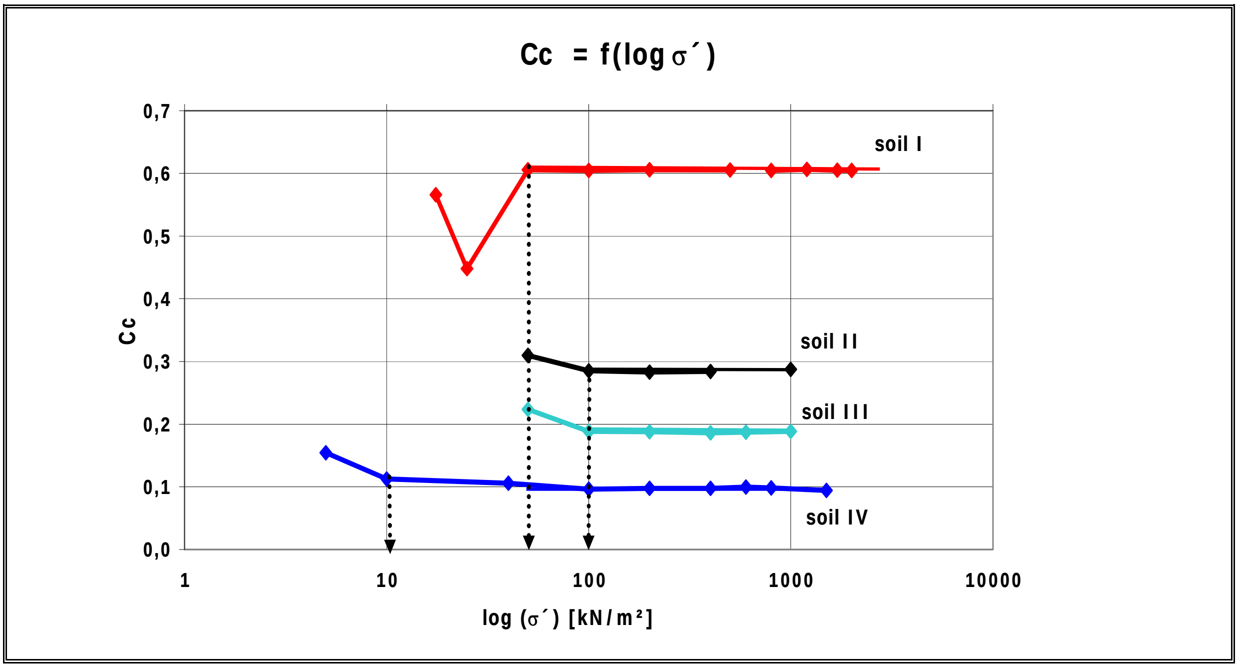


الشكل (٤-١-٦) مثال عن نتائج العلاقات بين معاملات المسامية و الضغوط الفعّالة للأتربة الأربعة

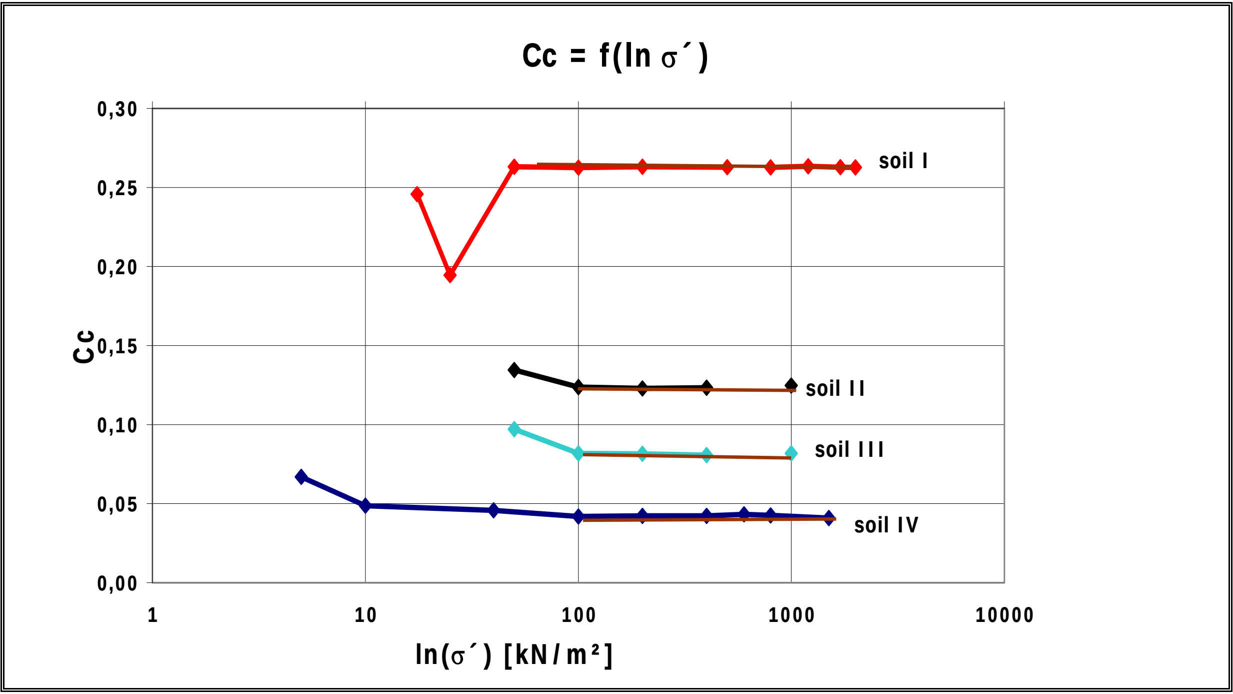
$C_c = f(\log\sigma')$
$C_c = f(\ln\sigma')$

٤-١-٥ العلاقة بين قرينة الإنضغاط والإجهاد الفعّال المطبق

تم تمثيل العلاقة بين قرينة الإنضغاط الناتجة من التجربة والضغط الفعّال المطبق من خلال إستخدام طريقتين أو مقياسين اللوغارتم العشري واللوغارتم الطبيعي , يبين الشكل ٤-١-٧ العلاقة بمقياس نصف لوغارتمي (اللوغارتم العشري) , ويبين الشكل ٤-١-٨ العلاقة بمقياس نصف لوغارتمي (اللوغارتم الطبيعي , الأكثر إستخداما في الدول الناطقة باللغة الألمانية) , حيث يمكن أن يظهر بشكل واضح مجال الإجهادات الذي تثبت فيه قيم قرائن الإنضغاط (وبالتالي تحديد النقطة D). بصورة خاصة عند قيم الإجهادات الأكبر من ١٠٠ كيلونيوتن بالمتر المربع تثبت فيه قيم قرائن الإنضغاط في الأتربة الأربعة وهي نتيجة علمية معروفة ومشابهة أيضاً في حساب مقاومة القص في الأتربة الناعمة /21/, حيث يظهر مستقيم كولومب بصورة واضحة بعد قيمة للإجهادات مساوية تقريباً ل ١٠٠ كيلونيوتن بالمتر المربع .



الشكل (٤-١-٧) مثال عن نتائج العلاقة بين قرينة الإنضغاط والضغط الفعّال للأتربة الأربعة (مقياس لوغارتمي عشري)



الشكل (٤-١-٨) مثال عن نتائج العلاقة بين قرينة الإنضغاط والضغط الفعّال للأتربة الأربعة (مقياس لوغارتمي طبيعي)

كما يمكن أن نلاحظ بسهولة الإختلاف بين قيم قرائن الإنضغاط المحسوبة بالطريقتين , حيث تكبر القيم المحسوبة بالطريقة الأولى بمقدار (٢,٣) عن القيم المحسوبة بالطريقة الثانية (اللوغارتم الطبيعي) , لذا من المهم جداً عند تقييم النتائج معرفة الطريقة التي تم فيها حساب قرينة الإنضغاط وهو أمر غير واضح تماما في كثيرمن المراجع.

٤-١-٦ العلاقة بين معامل التشوه الخطي والضغط الفعّال المطبق بالإحداثيات العادية

$E_{oed} = f\,(\sigma')$

تم تعيين قيم معامل التشوه الخطي تجريبيا من العلاقة :

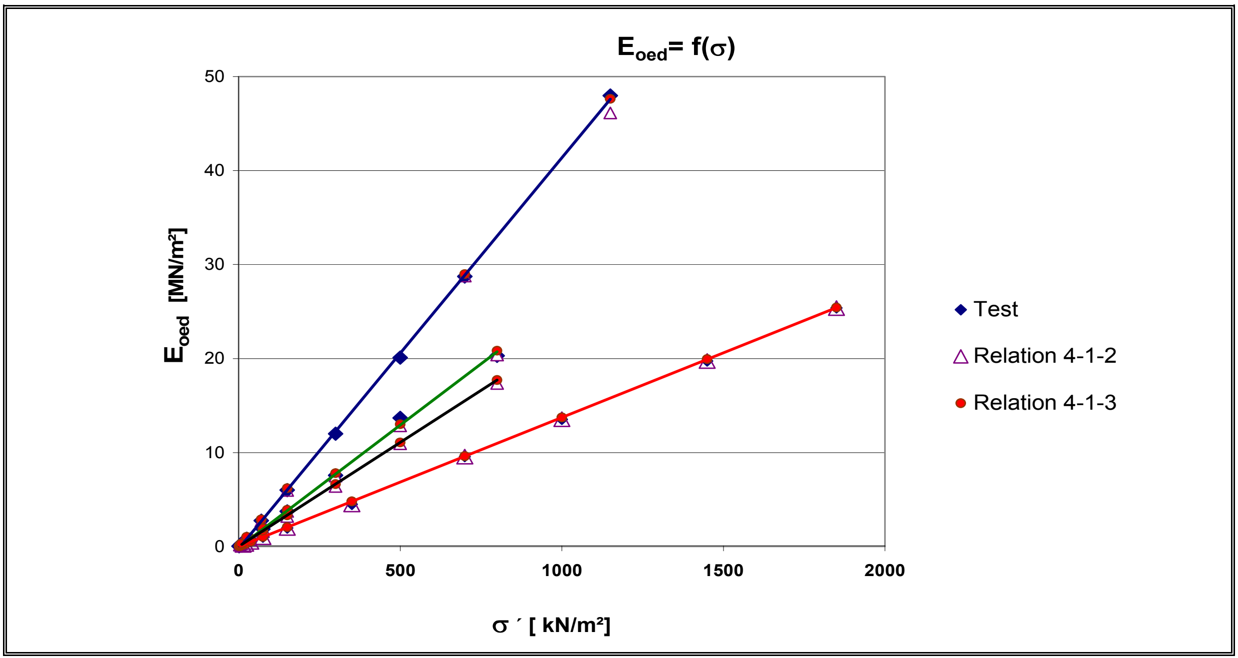
$$E_{oed} = \Delta\sigma \,/\, \Delta\varepsilon \qquad (٤\text{-}١\text{-}١)$$

ومن ثم تم تعيينه بإستخدام العلاقتين التاليتين (استناداً إلى الجدول ٢-٣-١ و ٢-٣-٢):

$$E_{oed}=((1+e_0)/C_c)*\Delta\sigma'/\log(\sigma'_2/\sigma'_1) \qquad (٤-١-٢)$$

$$E_{oed}=((1+e_0)/C_c)*\ln 10*\sigma'_m \qquad (٤-١-٣)$$

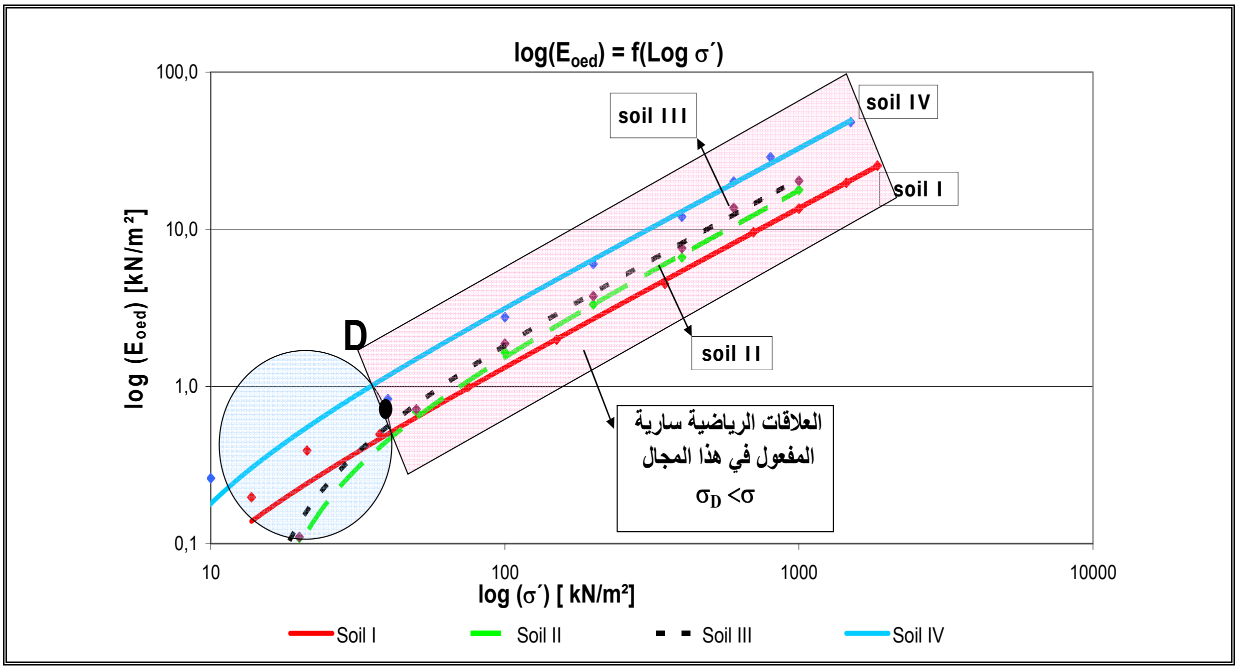
بعد ذلك تم تمثيل معامل التشوه الخطي المحسوب بالطرق الثلاثة أعلاه (العلاقات ٤-١-١ إلى ٤-١-٣) كتابع للضغوط الفعّالة المطبقة (المتوسطة) , حيث يبين الشكل (٤-١-٩) نتائج تمثيل هذه العلاقات للأتربة الأربعة . نلاحظ أن العلاقة بين معامل التشوه الخطي والضغوط الفعّالة في الأتربة الأربع هي علاقة خطية مستقيمة, وأن المستقيمات الممثلة لهذه التوابع بإستخدام الطرق الثلاثة متطابقة مع بعضها البعض تقريباً وخصوصا العلاقة ٤-١-١ والعلاقة ٤-١-٢لأنهما تنتجان من نفس المبدأ الحسابي (طريقة الوتر).



الشكل (٤-١-٩) العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق

٤-١-٧ العلاقة بين معامل التشوه الخطي والضغط الفعّال المطبق بالإحداثيات اللوغارتمية $\log E_{oed}= f(\log\sigma')$

من أجل ملاحظة التغيرات في مجال الضغوط (الإجهادات) الصغيرة تم تمثيل معامل التشوه الخطي الناتج عن التجربة كتابع للضغوط الفعالة المطبقة (المتوسطة) بمقياس لوغارتمي (الشكل ٤-١-١٠) , حيث نلاحظ أن العلاقات تصبح بشكل خطي مستقيم إعتباراً من قيم معينة للضغوط (σ_D) , وبالتالي يمكن تحديد مجال صلاحية إستخدام هذه العلاقات إعتباراً من الضغط المطبق σ_D وليس من بداية التجربة أومن الحمولة المطبقة الأولى , اي الموافق للنقطة D في الشكل ٤-١-١٠.



الشكل (٤-١-١٠) مجال صلاحية تطبيق العلاقة الخطية المستقيمة
بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (مقياس لوغارتمي)

٤-٢ تقييم نتائج التجارب (بالمقارنة مع نتائج المراجع)

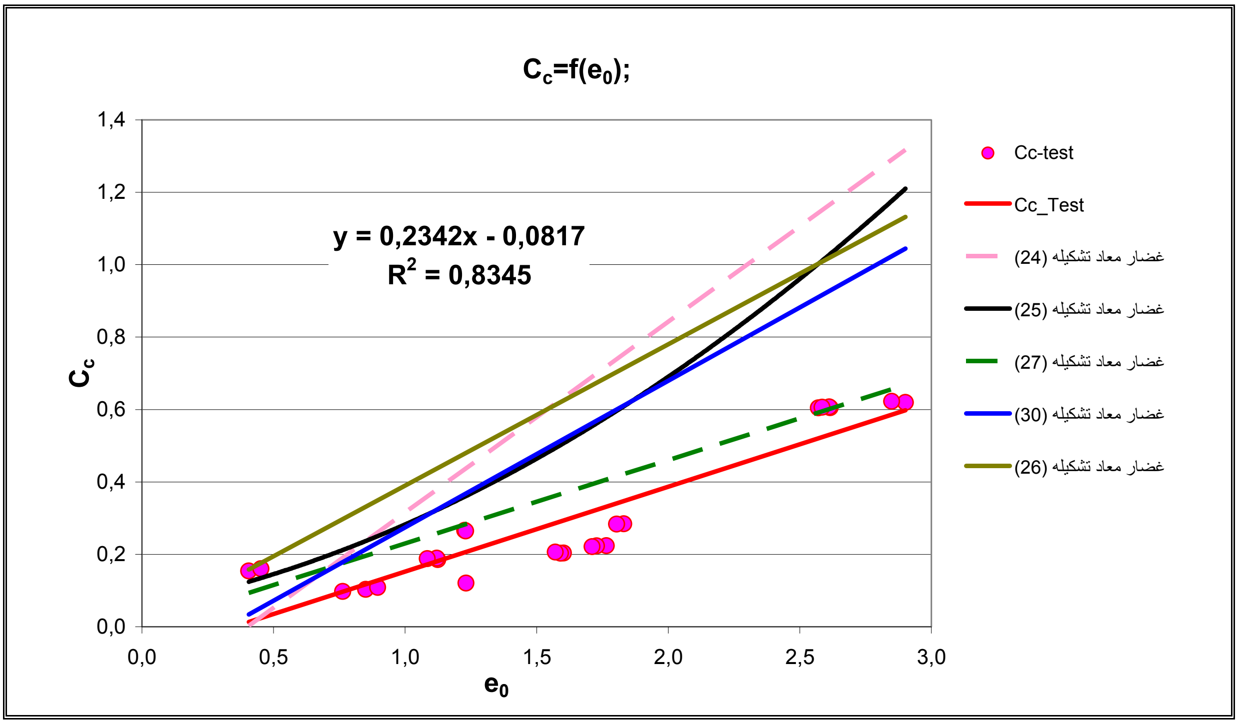
☜ قابلية تطبيق العلاقات السابقة المعمول بها في المراجع

بعد أن تم حساب قرائن الإنضغاط لجميع عينات الأتربة الأربعة تجريبيا وبالشروط الإبتدائية والإجهادية المستخدمة في هذا البحث, يمكن البدء بتقييم النتائج التجريبية ومقارنتها مع نتائج البحوث الأخرى .

كخطوة أولى في مرحلة التقييم تم تمثيل النتائج التجريبية لحساب قرائن الإنضغاط كتوابع للمتحولات (للخواص) المقترحة في المراجع والأبحاث المختلفة ومقارنتها مع قيم قرائن الإنضغاط الناتجة عن تطبيق العلاقات المقترحة في هذه المراجع . وبما أن هذا البحث يختص بالأتربة الناعمة المخربة المعاد تشكيلها فقد تم إختيار العلاقات التي ورد فيها صراحة أنها صالحة للأتربة المعادة التشكيل , والمقسمة إلى ست مجموعات كما في الفقرة ٢-٦ دراسة العلاقات التجريبية لتقدير قرينة الإنضغاط.

١)- العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط C_c بمعامل المسامية الإبتدائي e_0

يبين الشكل ٤-٢-١ النتائج التجريبية لعلاقة قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي بالمقارنة مع نتائج الأبحاث الأخرى . فبالرغم من الحصول تجريبياً على معامل إرتباط جيد نسبياً ($R^2 = 0,8345$) بين قرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي إلا أن المقارنة مع علاقات الأبحاث الأخرى تظهر التباين في النتائج . إن أقرب علاقة للنتائج التجريبية هي العلاقة ٢٧ لغضار معاد التشكيل والتي لها نفس الميل وتختلف فقط في الثابت b (الجدول ٢-٦-١).



الشكل (٤-٢-١) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج الأبحاث الأخرى لعلاقات قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية الإبتدائي

كما هو واضح في الشكل فإن معادلة المستقيم الممثل لنتائج التجارب يعطى بالعلاقة التالية (٤-٢-١):

$$C_c = 0,2342 * e_0 - 0,0817 \quad (R^2 = 0,8345) \qquad (٤\text{-}٢\text{-}١)$$

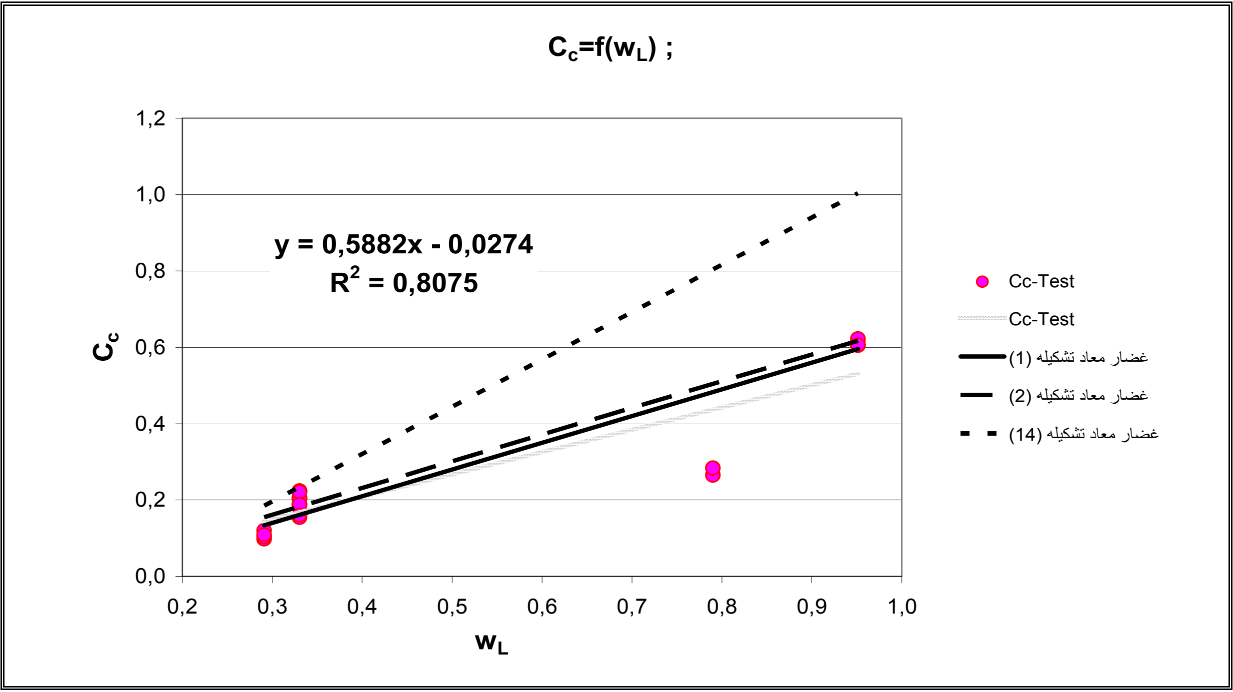
☑ ويمكن أن نستنتج عموماً أن التباين بين قيم قرائن الإنضغاط المعينة تجريبياً والمحسوبة من العلاقات السابقة, لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات إضافية أخرى , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط من معامل المسامية الإبتدائي وحده هو أمر غير مرض وغير كاف (عموماً) بالرغم من قيمة معامل الإرتباط الخطي المقبولة نسبياً.

٢)- العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية w_0

للأسف لم يعثر في المراجع والبحوث المدروسة على أي علاقة تربط قرينة الإنضغاط بالرطوبة الإبتدائية في الأتربة الناعمة المعاد تشكيلها.

٣)- العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بحد السيولة w_L

يبين الشكل (٤-٢-٢) النتائج التجريبية لعلاقة قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة بالمقارنة مع نتائج الأبحاث الأخرى العلاقات ١ , ٢, ١٤ الواردة في الجدول٢-٦-٣ والتي تخص غضار معاد تشكيله.
وكما هو واضح فإن النتائج التجريبية وخصوصاً لقيم حد السيولة الأصغرمن ٠,٥ قريبة جداً من نتائج العالم سكيمبتون بإستثناء نتائج التربة ٢ , والتي تعتبر أكثر العلاقات ورودا في المراجع المختلفة .



الشكل (٤-٢-٢) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج الأبحاث الأخرى لعلاقات قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة

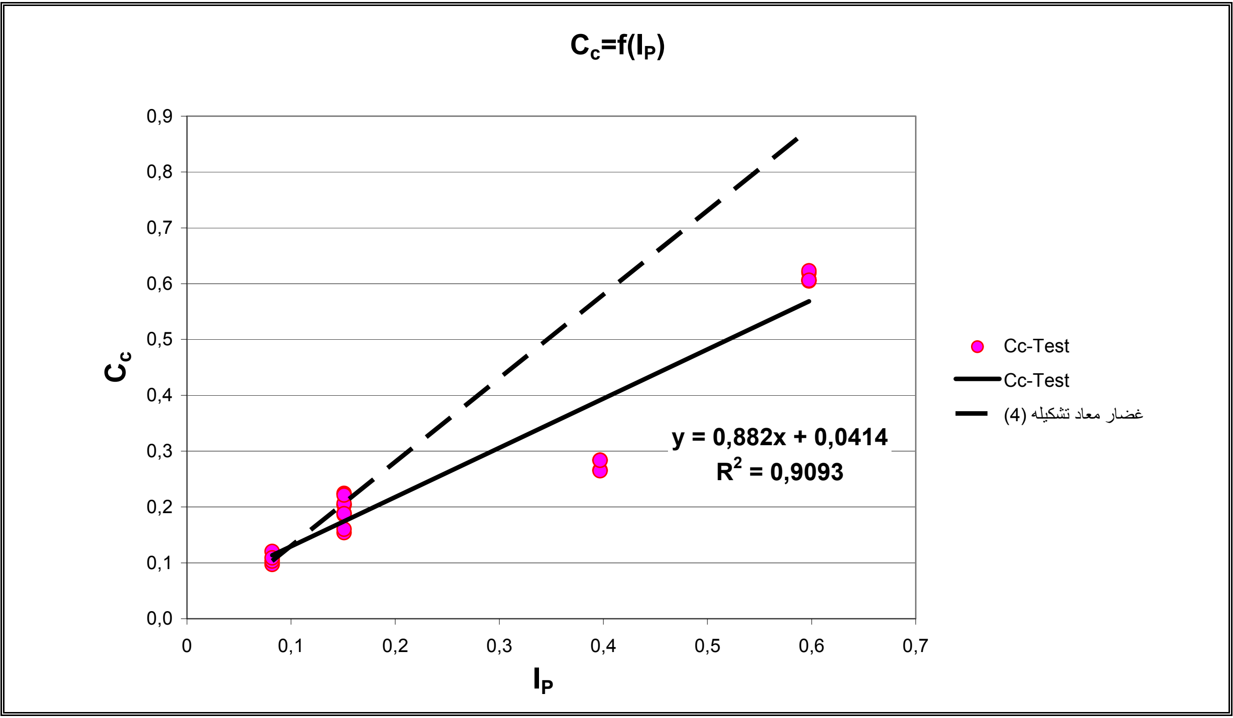
أما العلاقة ١٤ فهي مختلفة بشكل واضح عن النتائج التجريبية, حيث تبين النتائج التجريبية أن العلاقة بين قرينة الإنضغاط ورطوبة حد السيولة هي علاقة خطية من الدرجة الأولى (العلاقة ٤-٢-٢) معامل الإرتباط الخطي فيها يساوي ٨٠% .

$$C_c = 0,5882 * w_L - 0,0274$$
$$C_c = 0,005882 * (w_L - 4,66) \qquad (٤-٢-٢)$$
$$(R^2 = 0,8075)$$

☑ ويمكن أن نستنتج عموماً أن التباين بين قيم قرائن الإنضغاط , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات إضافية أخرى , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط من رطوبة حد السيولة وحده هو أمر غير مرض وغير كاف (عموماً) بالرغم من قيمة معامل الإرتباط الخطي المقبول نسبياً.

٤)- العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة I_P

يبين الشكل ٤-٢-٣ مقارنة بين النتائج التجريبية لعلاقة قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة وبين نتائج الأبحاث الأخرى العلاقة ٤ في الجدول ٢-٦-٤لغضار معاد تشكيله.



الشكل (٤-٢-٣) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج الأبحاث الأخرى
لعلاقات قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة

تتوضع النقاط التجريبية بشكل متباين تحت المستقيم الممثل للعلاقة (٤) , وهي ترتبط مع بعضها البعض بالعلاقة ٤-٢-٣ , وهي علاقة خطية من الدرجة الأولى ذات معامل إرتباط يساوي تقريباً ٩١% .

$$C_c = 0,882 * I_P + 0,0414 \quad (R^2 = 0,9093) \qquad (٤-٢-٣)$$

☑ وكذلك الأمر هنا أيضاً , أي يمكن أن نستنتج عموماً أن التباين بين قيم قرائن الإنضغاط , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات إضافية أخرى , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لقرينة اللدونة فقط هو أمر غير مرض وغير كاف (عموماً) بالرغم من قيمة معامل الإرتباط الخطي العالية نسبياً.

٥)- العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمجموعة من العوامل الخاصة (مثل معامل المسامية عند حد السيولة e_L, المسامية الإبتدائية n_0 , الوزن الحجمي الجاف γ_d)

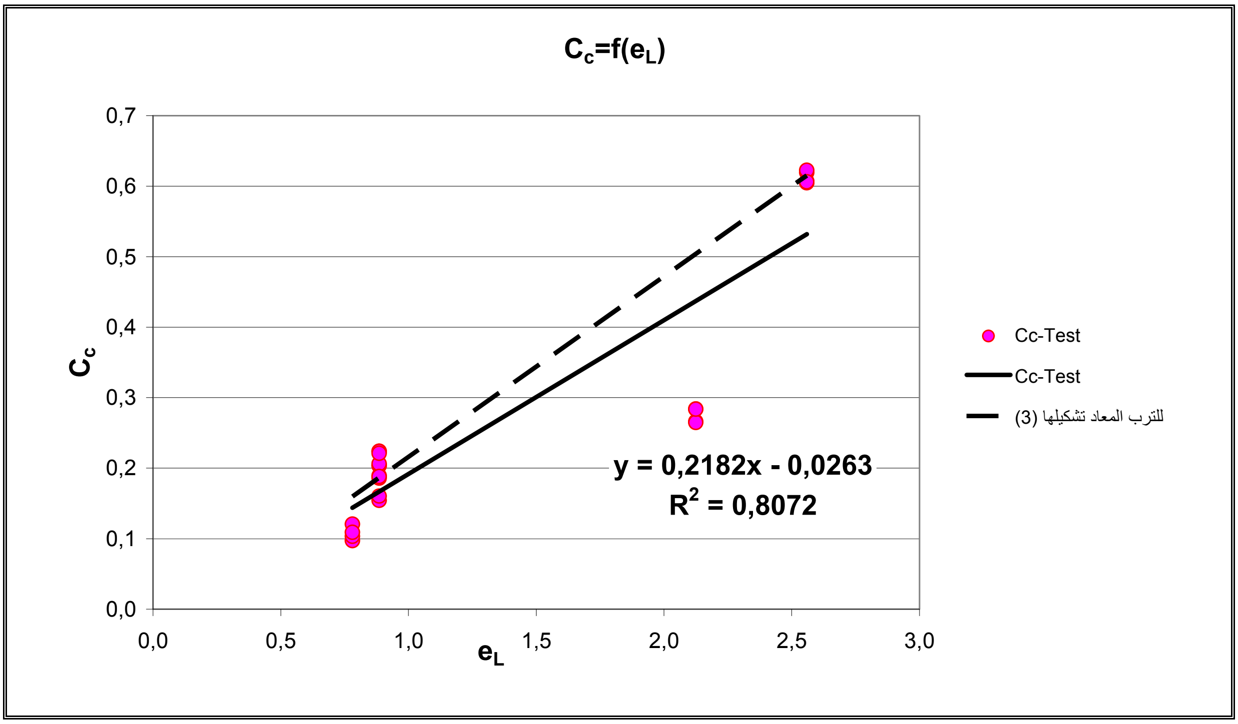
وجدت علاقة واحدة في هذه المجموعة تخص الغضار المعاد تشكيله , وتربط قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية عند حد السيولة (العلاقة ٣) , أما بالنسبة لبقية المتغيرات المسامية الإبتدائية n_0 و الوزن الحجمي الجاف γ_d فلم توجد علاقات تخص الأتربة المعاد تشكيلها.

مثلت نتائج التجارب في الشكل (٤-٢-٤) بالمقارنة مع نتائج العلاقة ٣ الواردة في الجدول ٢-٦-٥ .

كما هو واضح , فإن النقاط التجريبية قريبة جداً من نتائج العلاقة ٣ بإستثناء نتائج التربة ٢ , وهي تمثل علاقة خطية من الدرجة الاولى بمعامل إرتباط يساوي ٨١% تقريباً.

$$C_c = 0,2182 * e_L - 0,0263 \quad (R^2 = 0,8072) \qquad (٤-٢-٤)$$

☑ أيضاً , يمكن أن نستنتج هنا أن التباين بين قيم قرائن الإنضغاط , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات إضافية أخرى , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لمعامل المسامية عند حد السيولة فقط هو أمر غير مرض وغير كاف (عموماً) بالرغم من قيمة معامل الإرتباط الخطي المقبول نسبياً.



الشكل (٤-٢-٤) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج الأبحاث الأخرى لعلاقات قرينة الإنضغاط بمعامل المسامية عند حد السيولة

٦) العلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بأكثر من متغير (متحول)

يبين الجدول ٤-٢-١ نتائج التجارب للعلاقة بين قرائن الإنضغاط وبعض المتحولات كالوزن النوعي وقرينة اللدونة وحد السيولة ومعامل المسامية الإبتدائي كما هو مبين في عمود التابع في الجدول , حيث درست هذه العلاقات بتغيير متحول وبتثبيت المتحولات الأخرى , وقد درس تأثير هذه المتحولات بشكل منفرد ومفصل على قرينة الإنضغاط أعلاه , لذا حصلنا على نفس التوابع المذكورة سابقاً , وبالتالي يمكن أن نستنتج نفس الإستنتاجات السابقة.

رقم العلاقة	العلاقة	التابع
(٤-٢-٣)	$C_c = 0,882 * I_P + 0,0414$ $(R^2 = 0,9093)$	$C_c = f(I_p, G_s)$ $C_c = f(I_p, e_0)$
(٤-٢-٢)	$C_c = 0,2342 * e_0 - 0,0817$ $(R^2 = 0,8345)$	$C_c = f(e_0, I_p, w_L)$
(٤-٢-١)	$C_c = 0,5882 * w_L - 0,0274$ $C_c = 0,005882 * (w_L - 4,66)$ $(R^2 = 0,8075)$	$C_c = f(w_L, e_0)$

الجدول (٤-٢-١) النتائج التجريبية للعلاقة بين قرائن الإنضغاط وبعض المتحولات

☑ والخلاصة يمكن أن نستنتج من هذه الدراسة (أعلاه) أن التباين بين قيم قرائن الإنضغاط , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات إضافية أخرى , وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لمتحول واحد فقط مثل معامل المسامية الإبتدائي أو حد السيولة أو قرينة اللدونة أو أكثر (متحولين أو أكثر من هذه المتحولات) هو أمر غير مرض وغير كاف (عموماً) بالرغم من قيم معاملات الإرتباط المقبولة إلى العالية نسبياً , حيث يمكن أن يكون أحد أسباب الإختلاف فيما بين النتائج التجريبية والمرجعية وفيما بينها أيضاً هوالإختلاف بالشروط الإبتدائية للعينات وللتجارب, وما يؤكد ذلك هو تطابق النتائج التجريبية (تقريباً) مع نتائج العالم سكيمبتون وهي العلاقة بين قرينة الإنضغاط ورطوبة حد السيولة, بسبب تقارب الشروط الإبتدائية فيما بينها قارن العلاقة ٤-٢-١ وعلاقتي سكيمبتون ١ و ٢ في الجدول ٢-٦-٣ , حيث كان الإنطلاق في التجارب من رطوبات إبتدائية تساوي رطوبات حد السيولة كما فعل سكيمبتون في دراساته التجريبية.

٤-٣ دراسة وتقييم النتائج التجريبية

أعطت العلاقات الرياضية (التجريبية) المقترحة في المراجع المختلفة قيماً تقديرية لقرينة الإنضغاط , كما رأينا في مجرى هذا البحث , وقد تباينت القيم الناتجة بشكل واضح حتى في العلاقات التابعة لنفس المتحول , وكذلك النتائج التجريبية في هذا البحث لم تكن قريبة بشكل مرضي من تلك القيم , لذلك كان من غير الممكن تبني علاقة معينة من هذه العلاقات المرجعية , و كان لابد من دراسة تأثير هذه المتحولات من جديد و إيجاد علاقات جديدة ذات دقة مقبولة تصف العلاقة بين قرينة الإنضغاط وخواص المادة بشكل أفضل.

بالإضافة إلى دراسة تأثير بعض العوامل أو الخواص المعروفة المقترحة في المراجع على قرينة الإنضغاط كالرطوبة الإبتدائية و معامل المسامية الإبتدائي و حد السيولة و قرينة اللدونة تم دراسة تأثير بعض العوامل الجديدة , والتي يمكن أن تكون ذات تأثير أكبر على قرينة الإنضغاط (بشكل خاص) و على الإنضغاطية (بشكل عام) , ويمكن أن تصف العلاقة بينها بشكل أفضل كتأثير نسبة المواد الناعمة (السيلت والغضار) و الفعّالية و الفعّالية المعدّلة .

تمت الدراسة وفق المراحل التالية , مع التنويه أنه استخدمت الصيغ الرياضية التجريبية التي أعطت أعلى معامل إرتباط وأصغر خطأ معياري /2/ :

١. **دراسة تأثير الرطوبة الإبتدائية و معامل المسامية الإبتدائي و حد السيولة و قرينة اللدونة على قرينة الإنضغاط .**
٢. **دراسة تأثير نسبة الحبيبات الناعمة (السيلت والغضار) و الفعّالية و الفعّالية المعدّلة على قرينة الإنضغاط.**
٣. **دراسة تأثير أكثر من متغير (متحول) على قرينة الإنضغاط.**
٤. **دراسة تأثير قرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي على معامل التشوه الخطي.**
٥. **دراسة تأثير الفعّالية المعدّلة على معامل التشوه الخطي.**

☜ تمت دراسة وتقييم نتائج التجارب ومعرفة تأثير كل من العوامل (أو الخواص) المذكورة أعلاه على قرينة الإنضغاط بطريقتين:

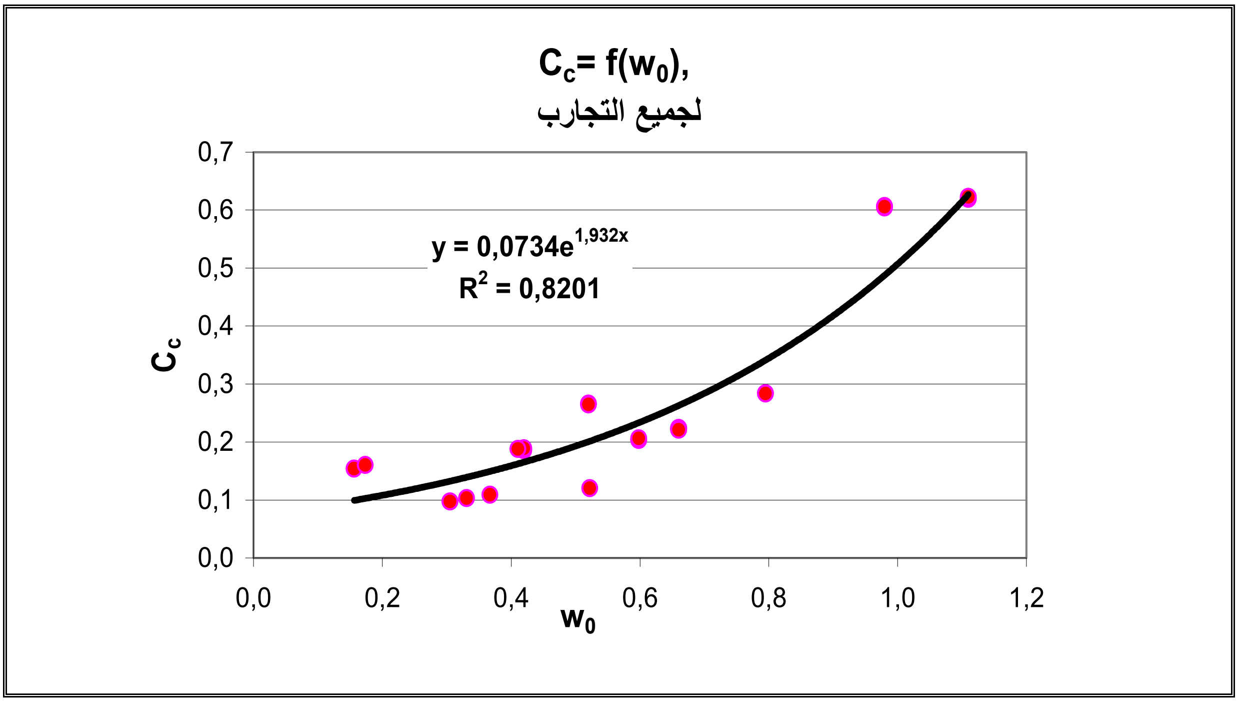
١) دراسة تأثير كل عامل من العوامل على قرينة الإنضغاط بإعتبار نتائج جميع التجارب المجراة على الأتربة الأربعة المختارة والمختلفة في شروطها الإبتدائية نسبياً أي إعتبار جميع النقاط التجريبية في العلاقات المستخرجة.
٢) دراسة تأثير كل عامل من العوامل على قرينة الإنضغاط بإعتبار نتائج التجارب المجراة على الأتربة الأربعة المختارة المتماثلة في شروطها الإبتدئية من حيث الرطوبة الإبتدائية والتي تساوي رطوبة حد سيولتها أو قريبة منها.

٤-٣-١ دراسة تأثير الرطوبة الإبتدائية و معامل المسامية الإبتدائي و حد السيولة و قرينة اللدونة على قرينة الإنضغاط

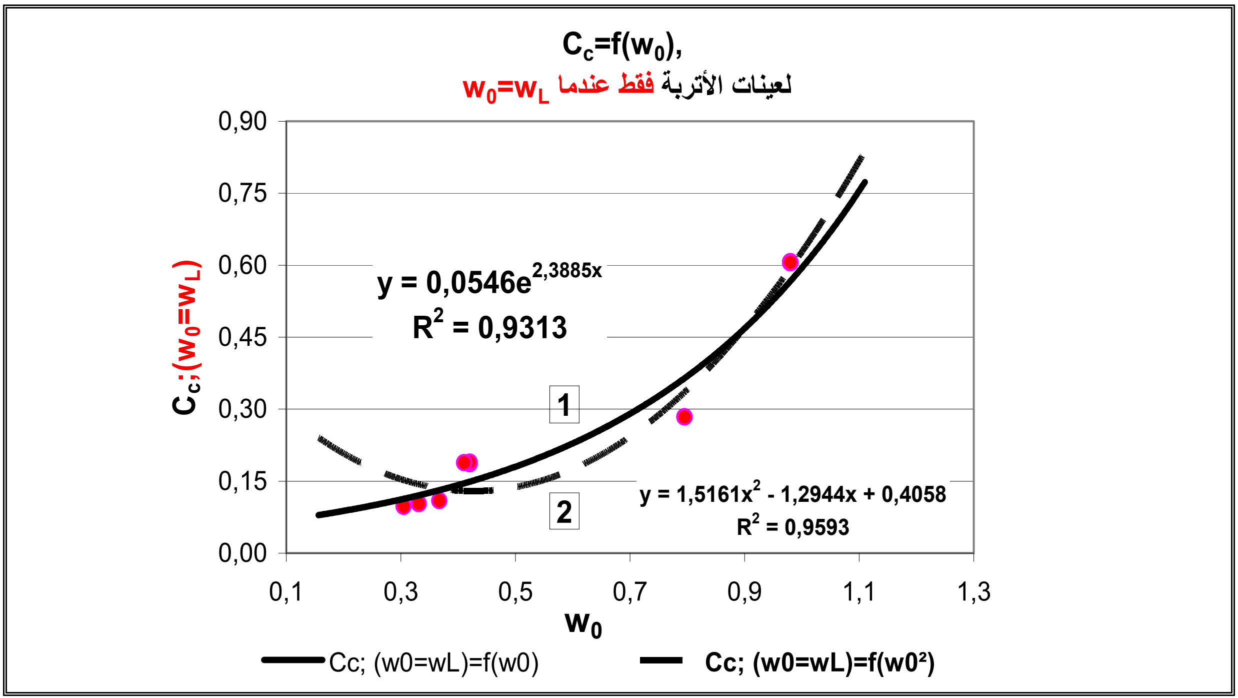
١) تأثير الرطوبة الإبتدائية للعينات على قرينة الإنضغاط

درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط والرطوبة الإبتدائية بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة (خطية و أسية و لوغارتمية) و إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة وهي العلاقة (٤-٣-١) الموضحة في الشكل (٤-٣-١), وهي علاقة أسية ذات معامل إرتباط يساوي٨٢ % تقريباً.

$$C_c = 0{,}0734 * e^{1{,}932 w_0} \quad (R^2 = 0{,}8201) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}١)$$



الشكل (٤-٣-١) العلاقة بين الرطوبة الإبتدائية وقرينة الإنضغاط
(نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة)



الشكل (٤-٣-٢) العلاقة بين الرطوبة الإبتدائية وقرينة الإنضغاط
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

١- المنحني الممثل لأفضل علاقة (مقبولة فيزيائيا)
٢- المنحني الممثل لأفضل معامل إرتباط (علاقة من الدرجة الثانية, غير مقبولة فيزيائيا)

في الطريقة الثانية تمت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط والرطوبة الإبتدائية للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط , حيث تبين أيضاً بتجريب التوابع المختلفة أن أفضل علاقة بينهما هي العلاقة (٤-٣-٢) وهي علاقة أسية ذات معامل إرتباط يساوي ٩٣% تقريباً , هذا بالرغم من وجود علاقة أخرى من الدرجة الثانية تعطي معامل إرتباط أكبر ٩٦% تقريباً, لم يتم اختيارها بسبب عدم صحتها فيزيائياً (قارن الشكل ٤-٣-٢)

$$C_c = 0{,}0546 * e^{2{,}3885 * w_0} \quad (R^2 = 0{,}9313) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}٢)$$

a

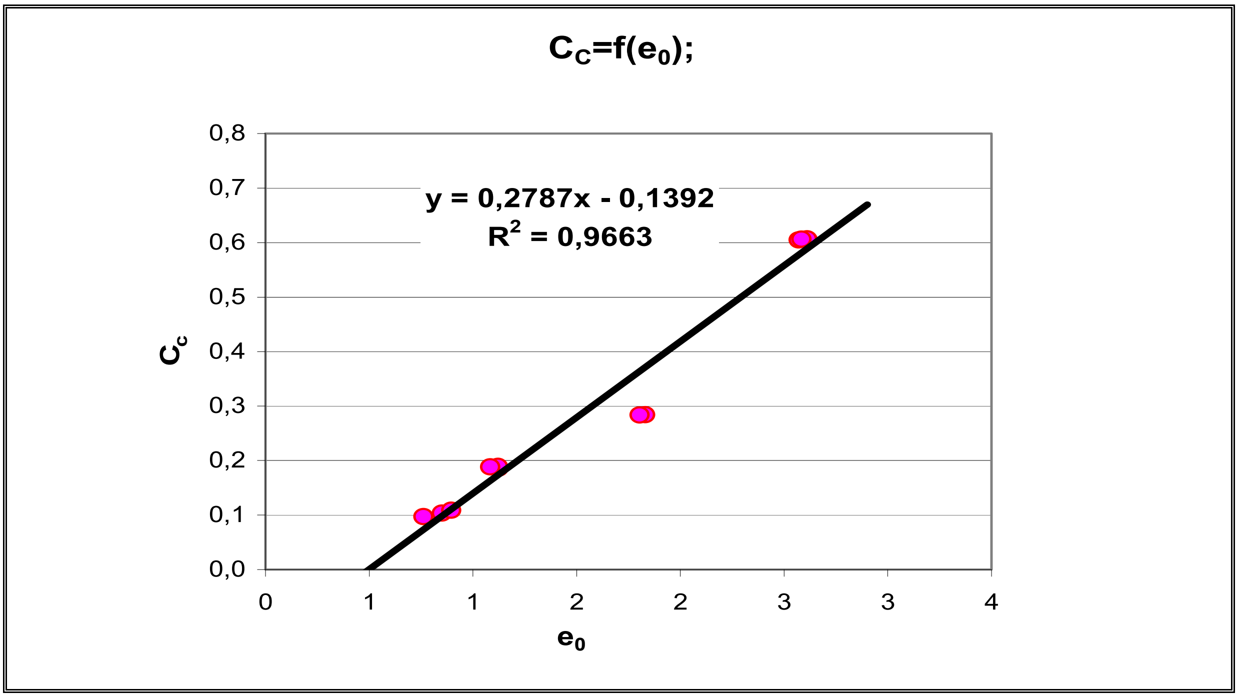
☑ بمقارنة الطريقتين أعلاه يمكن أن نستنتج أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة, حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٨٢% إلى ٩٣% تقريباً, قارن الشكلين (٤-٣-١ و ٤-٣-٢) وهي نتيجة متوقعة.

٢) تأثير معامل المسامية الإبتدائي للعينات على قرينة الإنضغاط

بنفس الطريقة أعلاه درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) وتم إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة وهي العلاقة (٤-٢-١) الموضحة في الشكل (٤-٢-١), وهي علاقة خطية مستقيمة ذات معامل إرتباط يساوي٨٣ % تقريباً.

في الطريقة الثانية تمت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط , حيث تبين أيضاً بتجريب التوابع المختلفة أن أفضل علاقة بينهما هي العلاقة (٤-٣-٣) وهي علاقة خطية من الدرجة الأولى ذات معامل إرتباط يساوي ٩٧% تقريباً (الشكل ٤-٣-٣).

$$C_c = 0{,}2787 * e_0 - 0{,}1392 \quad (R^2 = 0{,}9663) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}٣)$$



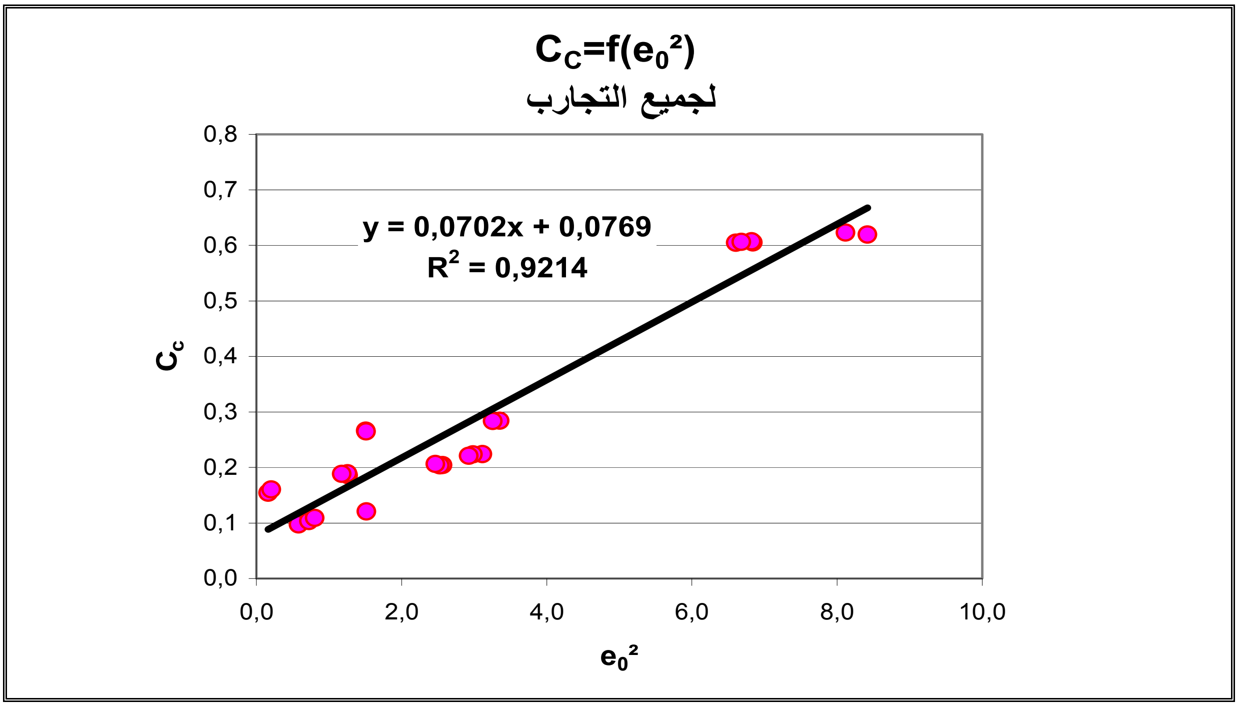
الشكل (٤-٣-٣) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و معامل المسامية الإبتدائي
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

بمحاولة لفهم مدى تأثير معامل المسامية الإبتدائي على قرينة الإنضغاط بشكل أفضل تم دراسة العلاقة بين مربع معامل المسامية الإبتدائي وقرينة الإنضغاط بتجربة توابع مختلفة أيضاً للحصول على علاقة ذات معامل إرتباط أعلى الشكلان ٤-٣-٤ و ٤-٣-٥, حيث وجد أن معامل الإرتباط الخطي يتحسن عند ربط قرينة الإنضغاط بمربع معامل المسامية الإبتدائي حيث إرتفع من٨٣ % إلى ٩٢% تقريباً بإعتبار نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة (العلاقة ٤-٣-٤) ومن ٩٧% إلى ٩٩% بإعتبار جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها (العلاقة ٤-٣-٥)

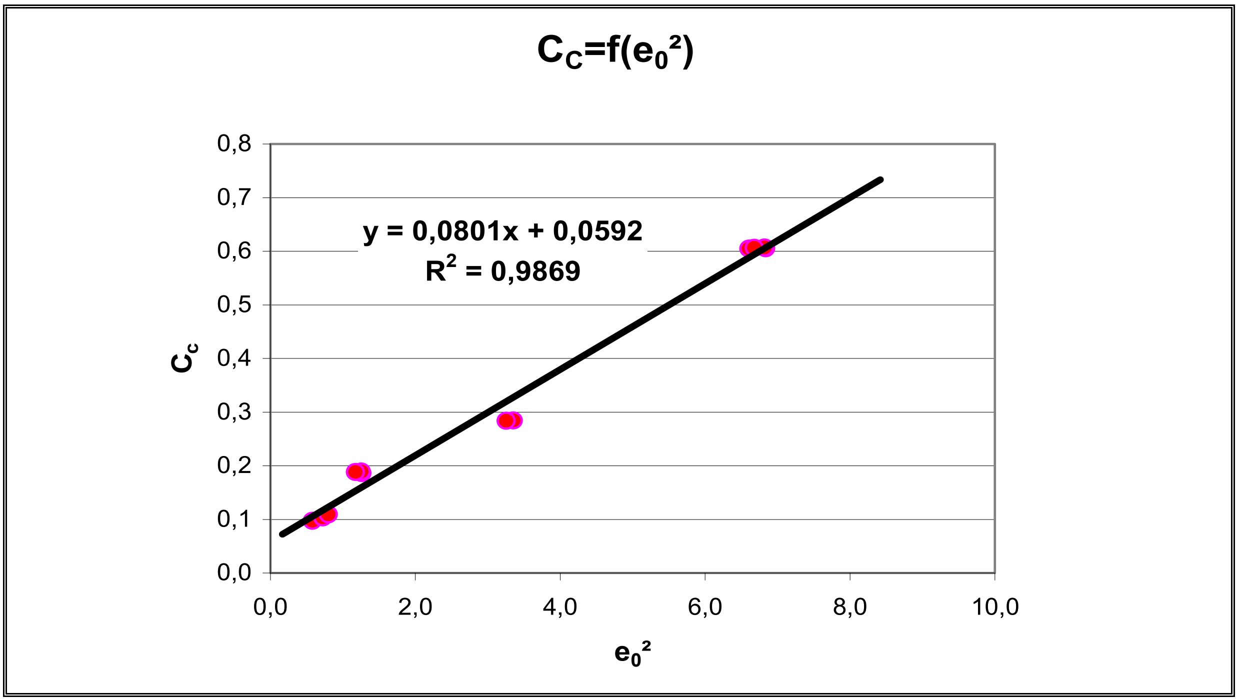
$$C_c = 0,0702 * e_0^2 + 0,0769 \quad (R^2 = 0,9214) \qquad (٤-٣-٤)$$

$$C_c = 0,0801 * e_0^2 + 0,0592 \quad (R^2 = 0,9869) \qquad (٤-٣-٥)$$

بمقارنة العلاقة (٤-٣-٥) مع العلاقة (٤-٣-٣) وهما للمتغير نفسه e_0 وتمثلان نتائج التجارب التي تكون فيها رطوبة العينة مساوية لرطوبة حد سيولتها لكن مع إختلاف شكل المعادلة المختار , نجد أن معامل الإرتباط الخطي ارتفع من ٩٦% و حتى ٩٨%.



الشكل (٤-٣-٤) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و مربع معامل المسامية الإبتدائي (نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة)



الشكل (٤-٣-٥) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و مربع معامل المسامية الإبتدائي
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

☑ بمقارنة النتائج مع بعضها البعض يمكن أن نستنتج أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة) , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٨٣% إلى ٩٧% تقريباً (قارن الشكلين (٤-٢-١ و٤-٣-٣).
كما أن قرينة الإنضغاط تتأثر بمربع معامل المسامية الإبتدائي أكثر , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي إلى ٩٩% تقريباً (الشكل ٤-٣-٥).

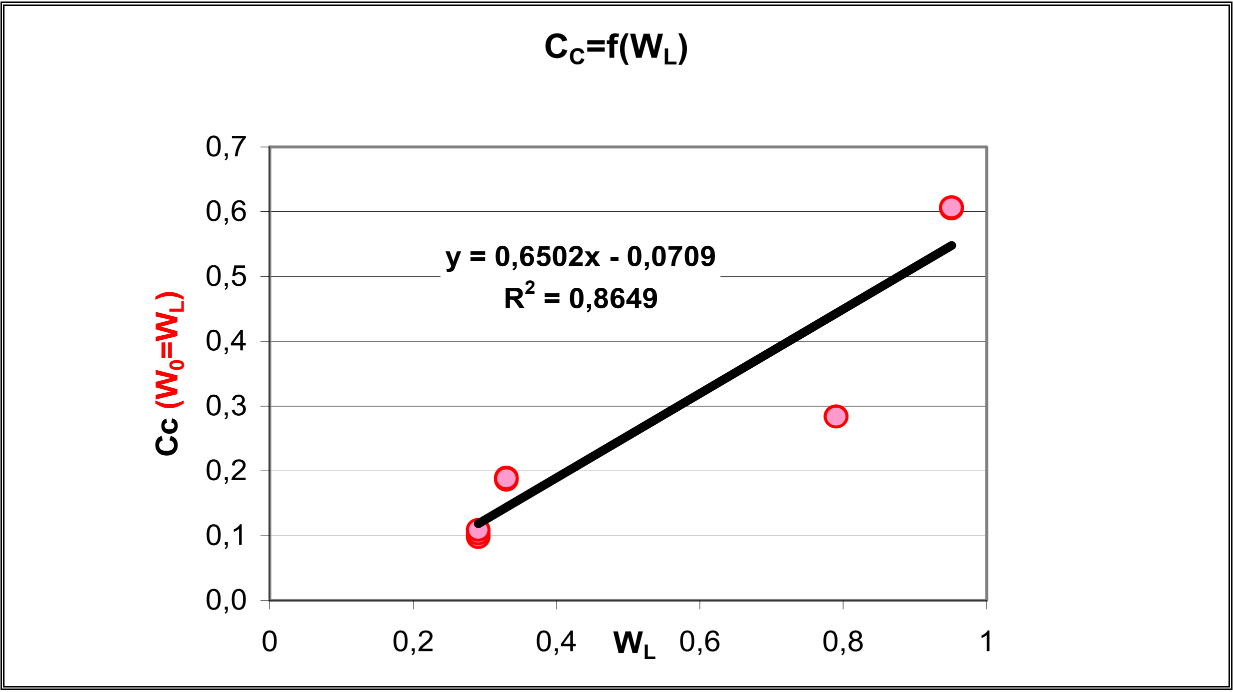
٣) تأثير حد السيولة للعينات على قرينة الإنضغاط

درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط ورطوبة حد السيولة بنفس المنهجية أعلاه بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) وتم إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة وهي العلاقة (٤-٢-٢) الموضحة في الشكل (٤-٢-٢), وهي علاقة خطية من الدرجة الأولى ذات معامل إرتباط يساوي٨٠ % تقريباً.

في الطريقة الثانية تمت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط ورطوبة حد السيولة للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط , حيث تبين أيضاً أن أفضل علاقة خطية بينهما هي العلاقة (٤-٣-٦) , وهي علاقة ذات معامل إرتباط يساوي ٨٦% تقريباً (الشكل ٤-٣-٦).

$$C_c = 0,6502 * w_L - 0,0709$$
$$C_c = 0,006502\ (w_L - 10,9) \qquad (٤-٣-٦)$$
$$(R^2 = 0,8649)$$

هذه العلاقة قريبة جداً من علاقة العالم سكيمبتون رقم (١) من الجدول (٢-٦-٣), وذلك ناتج عن توافق الشروط الإبتدائية (كما أعتقد) , حيث إستخدم العالم سكيمبتون عام ١٩٤٤ في تجاربه عينات غضارية مشكلة مخبرياً لها رطوبات إبتدائية تساوي رطوبات حد السيولة لتلك العينات أيضاً حسب المرجع /٢/, والفارق كان بدقة العلاقة , حيث كان معامل الإرتباط الخطي هنا أعلى مما هو في تجارب العالم سكيمبتون والتي يمكن أن يصل الخطأ فيها أي بقيمة قرينة الإنضغاط إلى ±٣٠ % حسب المرجع /١٩/ .



الشكل (٤-٣-٦) العلاقة بين قرينة الإنضغاط ورطوبة حد السيولة
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

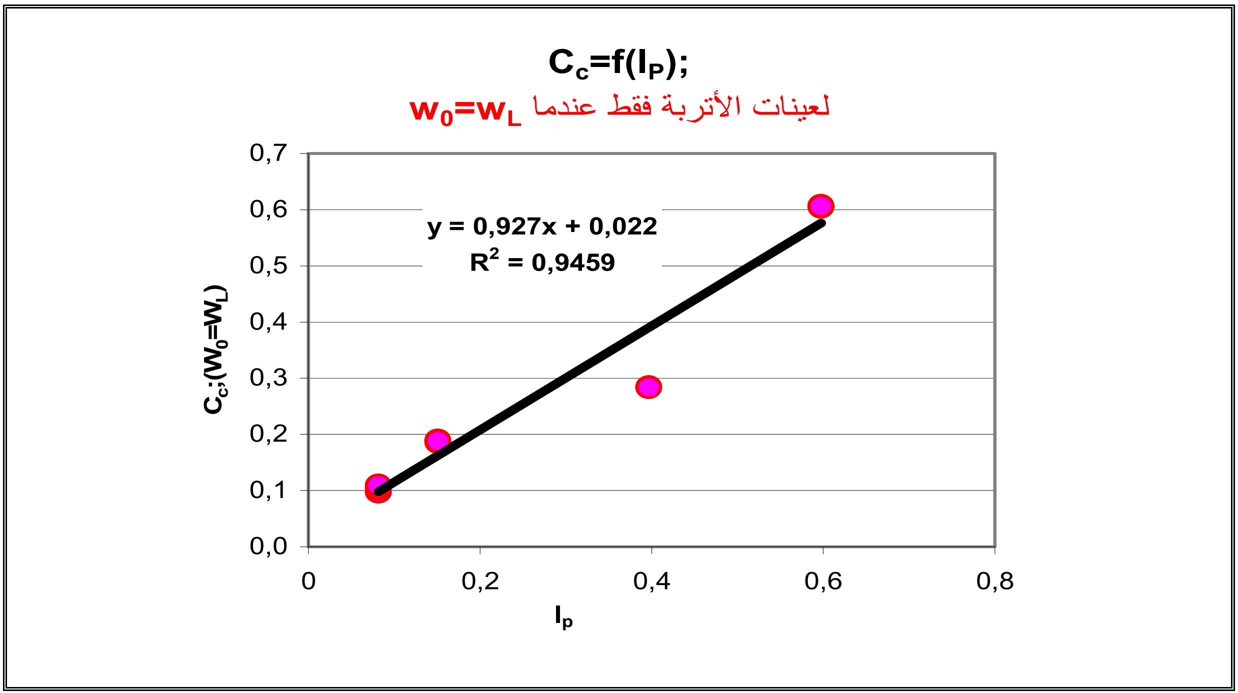
☑ يمكن أن نستنتج هنا أيضاً أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٨٠% إلى ٨٦% تقريباً قارن الشكلين (٤-٢-٢ و ٤-٣-٦).

٤) تأثير قرينة اللدونة للعينات على قرينة الإنضغاط

درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط وقرينة اللدونة بنفس المنهجية أعلاه بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) وتم إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة وهي العلاقة (٤-٢-٣) الموضحة في الشكل (٤-٢-٣), وهي علاقة خطية من الدرجة الأولى ذات معامل إرتباط يساوي ٩١ % تقريباً.

في الطريقة الثانية تمت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط وقرينة اللدونة للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط , حيث تبين أيضاً أن أفضل علاقة خطية بينهما هي العلاقة (٤-٣-٧) , وهي علاقة ذات معامل إرتباط يساوي ٩٥% تقريباً (الشكل ٤-٣-٧).

$$C_c = 0,927 * I_P + 0,022 \quad (R^2 = 0,9459) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}٧)$$



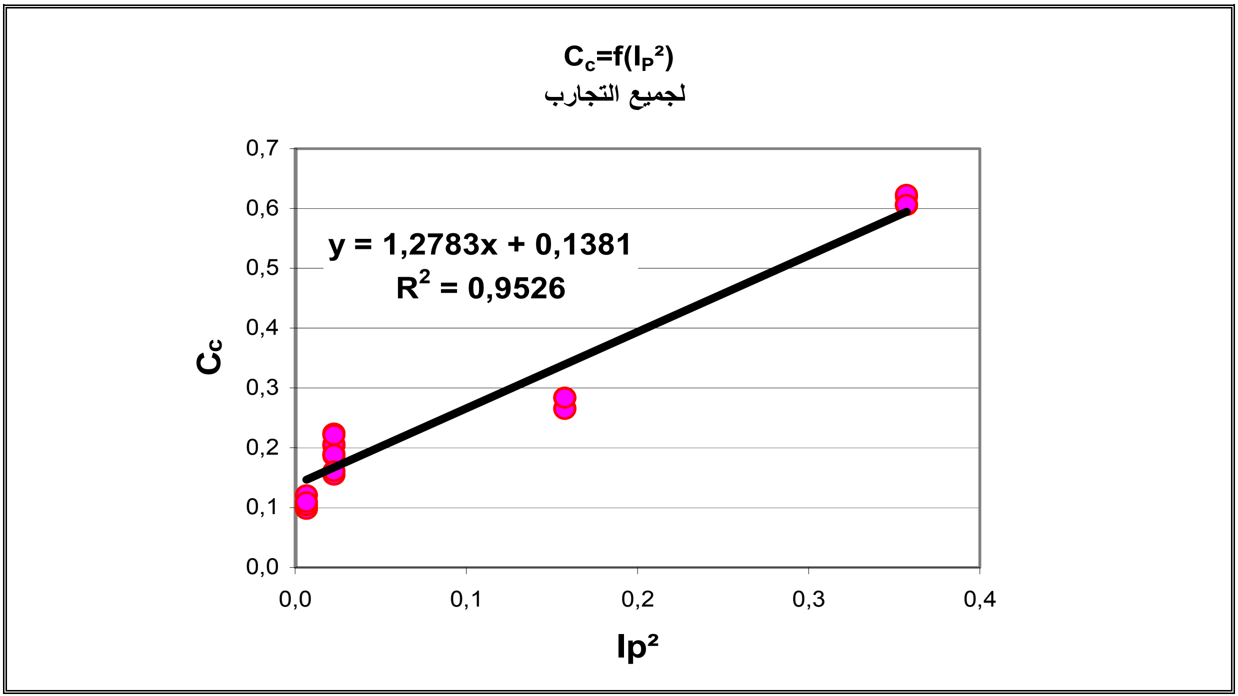
الشكل (٤-٣-٧) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و قرينة اللدونة
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

☑ بمقارنة النتائج مع بعضها البعض يمكن أن نستنتج أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٩١% إلى ٩٥% تقريباً قارن الشكلين (٤-٢-٣ و ٤-٣-٧).
كما يلاحظ أن معامل الإرتباط الخطي لعلاقة قرينة الإنضغاط بقرينة اللدونة (٩٥%) أعلى منه بالنسبة لعلاقة قرينة الإنضغاط برطوبة حد السيولة (٨٦%) , وهذا يوافق نتيجة البحث الوارد في المرجع /11/ بأن قرينة الإنضغاط أكثر تأثرا بقرينة اللدونة منها بحد السيولة.

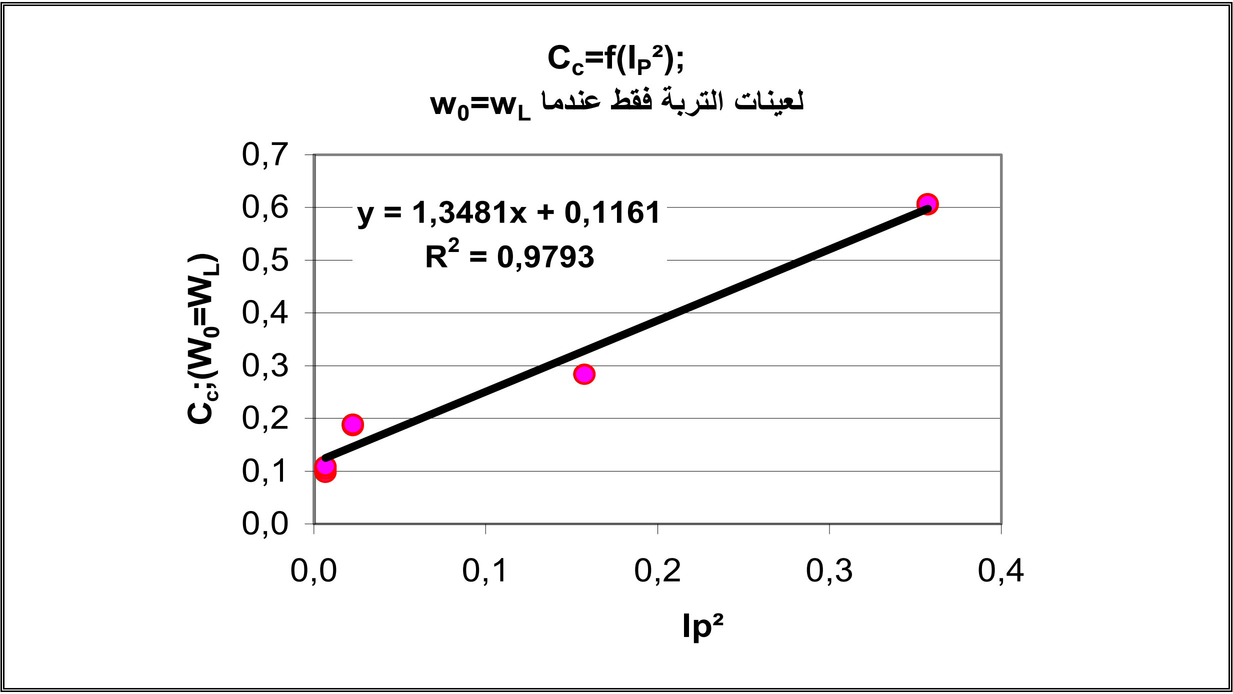
بمحاولة لفهم مدى تأثير قرينة اللدونة على قرينة الإنضغاط بشكل أفضل تم دراسة العلاقة بين مربع قرينة اللدونة وقرينة الإنضغاط و بتجربة توابع مختلفة أيضاً للحصول على علاقة ذات معامل إرتباط أعلى (الشكلان ٤-٣-٨ و ٤-٣-٩) , حيث وجد أن معامل الإرتباط الخطي يتحسن عند ربط قرينة الإنضغاط بمربع قرينة اللدونة حيث إرتفع من٩١ % إلى ٩٥% تقريباً بإعتبار نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة (العلاقة ٤-٣-٤) ومن ٩٥% إلى ٩٨% بإعتبار جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها (العلاقة ٤-٣-٩)

$$C_c = 1,2783 * (I_P)^2 + 0,1381 \quad (R^2 = 0,9526) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}٨)$$

$$C_c = 1,3481 * (I_P)^2 + 0,1161 \quad (R^2 = 0,9793) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}٩)$$



الشكل (٤-٣-٨) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و مربع قرينة اللدونة (نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة)



الشكل (٤-٣-٩) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و مربع قرينة اللدونة
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

☑ يمكن أن نستنتج هنا أيضاً أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٩١% إلى ٩٥% تقريباً ,قارن الشكلين (٤-٢-٣ و ٤-٣-٧).
كما أن قرينة الإنضغاط تتأثر بمربع قرينة اللدونة أكثر , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي إلى ٩٨% تقريباً (الشكل ٤-٣-٩).

٤-٣-٢ دراسة تأثير نسبة المواد الناعمة (السيلت والغضار) و الفعّالية و الفعّالية المعدّلة على قرينة الإنضغاط

٢) تأثير نسبة الغضار للعينات على قرينة الإنضغاط

لم يؤدي البحث في المراجع المختلفة إلى العثور على علاقات تربط قرينة الإنضغاط بنسبة الغضار , على الرغم من أن بعض العلماء قد ذكروا أن قرينة الإنضغاط تتعلق ببنية الغضار ومنرالاته /11/,/2/ وعموماً يمكن القول أن قرينة الإنضغاط تزداد بزيادة نسبة الغضار /11/ , فعند المقارنة بين عينتين غضاريتين مختلفتين من حيث نوع المنرالات في البحث الوارد في المرجع /11/ وُجد أن قرينة الإنضغاط تزداد مع زيادة نسبة الغضار وتتعلق بنوع المنرال الداخل في تركيبها , حيث كانت الزيادة أكبر في الغضار الحاوي على البينتونايت بالمقارنة مع الغضار الحاوي على الكاؤولينيت.

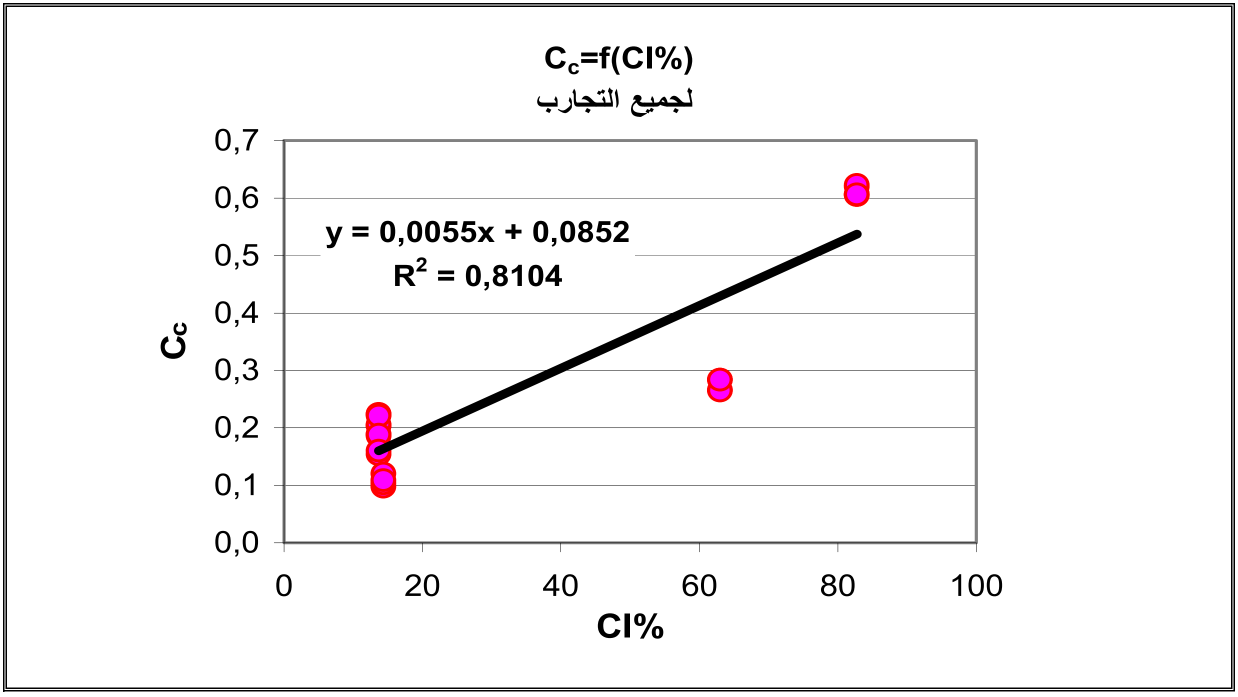
ويمكن أن نربط قلة الدراسات التي تناولت نسبة الغضار و تأثيره على قرينة الإنضغاط بأن حساب نسبة الغضار يحتاج إلى تجربة الترسيب والتي يحتاج تنفيذها إلى وقت ودقة أكبر بالمقارنة مع تجربة التركيب الحبي , لذا استعاض الباحثون عن دراسة نسبة الغضار بدراسة حدود آتربرغ للأتربة الغضارية , والتي تعكس إلى حد ما محتوى الغضار و نوع المنرالات الغضارية في التربة /11/.

درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط ونسبة الغضار بنفس المنهجية المعتمدة أعلاه بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) وتم إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة وهي العلاقة (٤-٣-١٠) الموضحة في الشكل (٤-٣-١٠), وهي علاقة خطية من الدرجة الأولى ذات معامل إرتباط يساوي ٨١ % تقريباً.

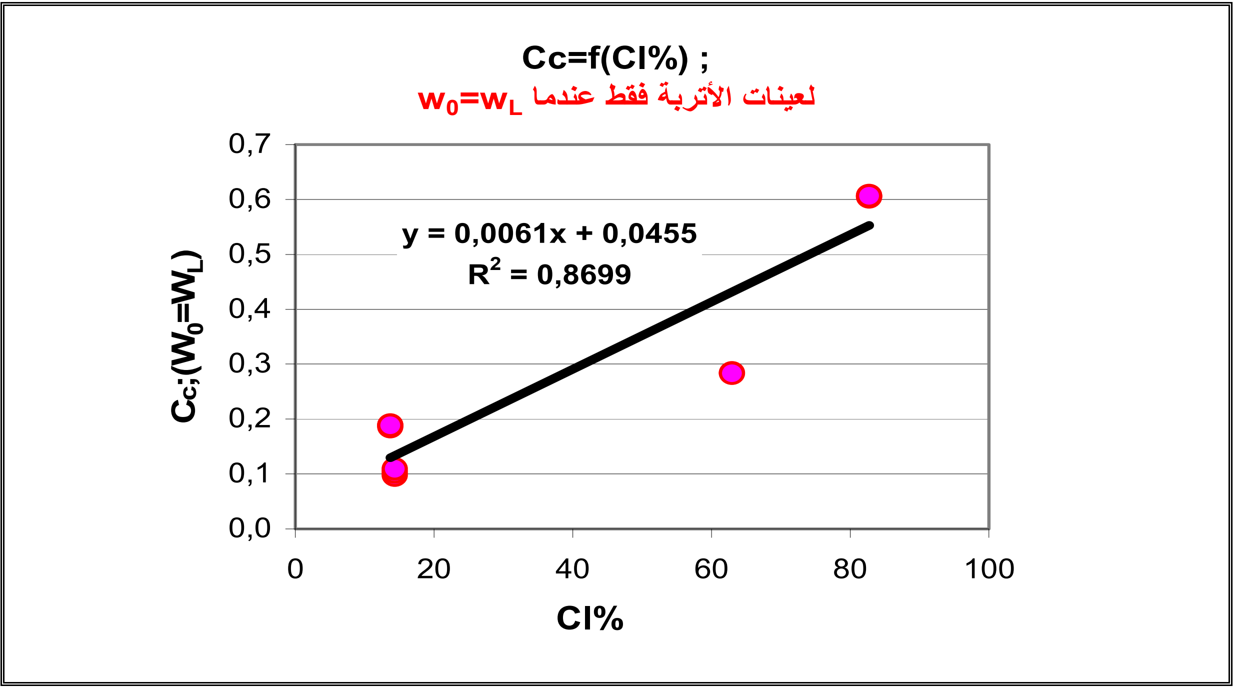
في الطريقة الثانية تمت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط ونسبة الغضار للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط , حيث تبين أيضاً أن أفضل علاقة خطية بينهما هي العلاقة (٤-٣-١١) , وهي علاقة ذات معامل إرتباط يساوي ٨٧% تقريباً (الشكل ٤-٣-١١).

$$C_c = 0,0055 *Cl + 0,0852 \quad (R^2 = 0,8104) \qquad (٤-٣-١٠)$$

$$C_c = 0,0061*Cl + 0,0455 \quad (R^2 = 0,8699) \qquad (٤-٣-١١)$$



الشكل (٤-٣-١٠) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و نسبة الغضار
(نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة)



الشكل (٤-٣-١١) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و نسبة الغضار
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

- درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط و نسبة المواد الناعمة السيلت و الغضار من جهة و كذلك السيلت الناعم والغضار من جهة أخرى أيضاً بنفس المنهجية المعتمدة أعلاه بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) وتم إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة , ولكن لم يتحسن معامل الإرتباط الخطي , بل إنخفض نوعا ما عن قيمته الواردة في العلاقات أعلاه العلاقة ٤-٣-١٠ و ٤-٣-١١ , لذا كان ليس بالضرورة وضع نتائج هذه الدراسة هنا .

☑ يمكن أن نستنتج هنا أيضاً أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٨١% إلى ٨٧% تقريباً قارن الشكلين (٤-٣-١٠ و ٤-٣-١١).
كما أن قرينة الإنضغاط تتأثر بنسبة الغضار بشكل واضح معامل الإرتباط الخطي ٨٧% تقريباً وتتعلق بنوع المنرال الداخل في تركيبها , و يقل هذا التأثير بشكل عام كلما كبرت أبعاد الحبات .

٣) تأثيرالفعّالية (سكيمبتون) و الفعّالية المعدّلة للعينات على قرينة الإنضغاط

قبل البدء بدراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط وبين الفعّالية (سكيمبتون) وكذلك العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية المعدّلة (مارديني) لابد من التذكير بتعريف كل منهن :

☜ **الفعّالية (سكيمبتون):**

هي نسبة قرينة اللدونة I_p إلى نسبة حبيبات الغضار F% في عينة ما , أي تعطى بالعلاقة ٤-٣-١٢:

$$A = I_p / F\%$$
حيث $F:(d \leq 0,002\ mm)$ (٤-٣-١٢)

☜ **الفعّالية المعدّلة (مارديني) /10/ :**

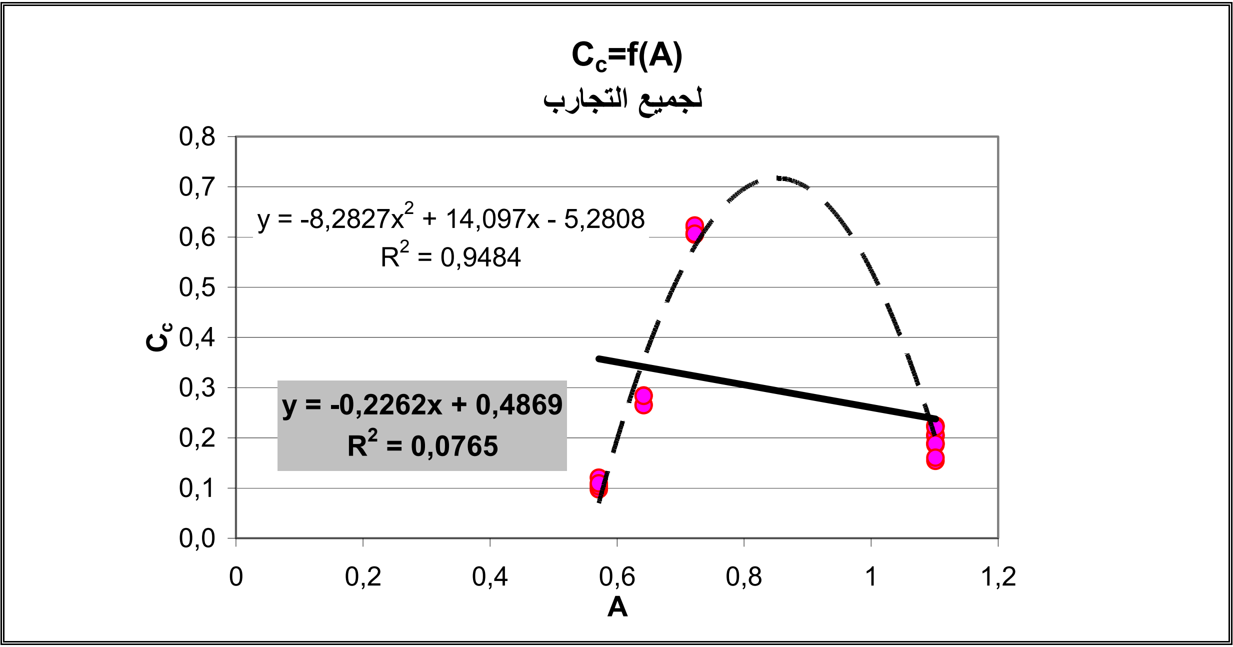
هي نسبة مربع قرينة اللدونة I_p^2 إلى نسبة حبيبات الغضار وحبيبات السيلت الناعم F% في عينة ما , أي تعطى بالعلاقة ٤-٣-١٣:

$$A_m = I_p^2 / F\%$$
حيث $F:(d \leq 0,0063\ mm)$ (٤-٣-١٣)

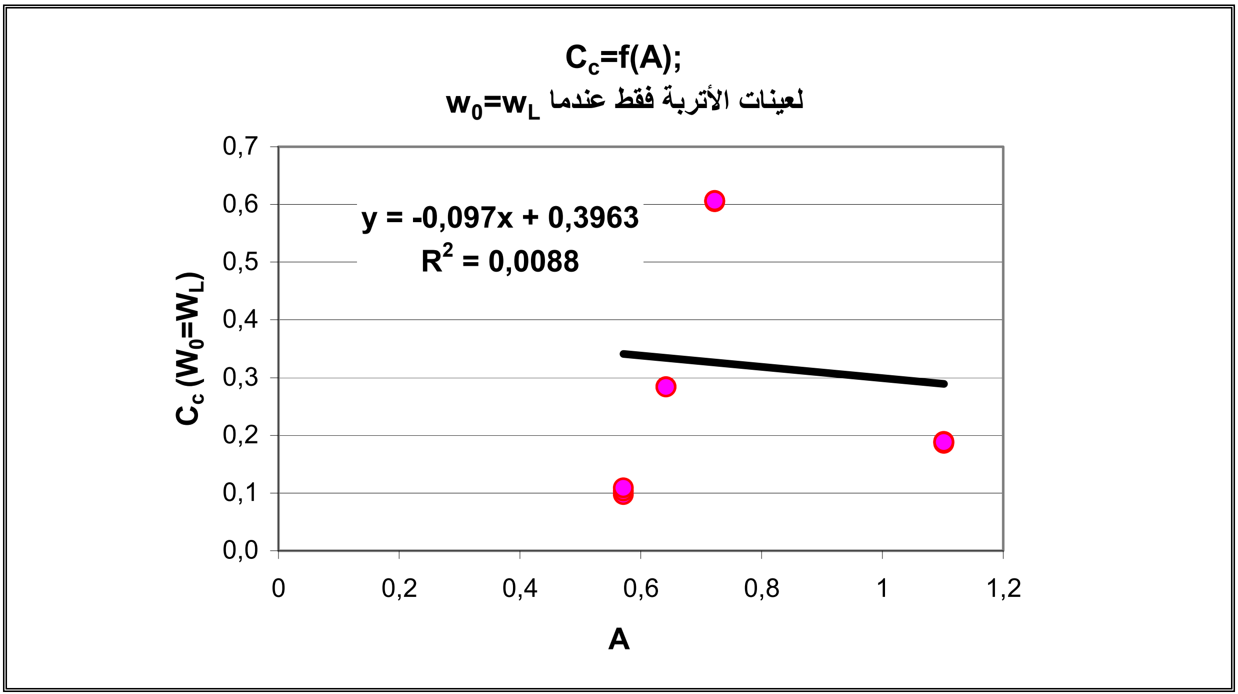
وقد اقترحت الفعّالية المعدّلة كما جاء بالدراسة بإعتبارها تعبر عن تصرف التربة الناعمة بشكل أفضل من خلال المحتوى والتركيب المينيرالي وكمية الحبيبات الناعمة (ذات الاقطار مم 0.0063 ≥ d), فعلى العكس من الفعّالية حسب سكيمبتون فإن دور قرينة اللدونة في الخواص يصبح أقل (مربع قرينة اللدونة) , وتؤخذ كمية الحبيبات الناعمة ذات الأقطار بين (مم ٠.٠٠٦٣ - ٠.٠٠٢) بعين الإعتبار بشكل إضافي باعتبار أن المنرالات الغضارية موجودة في مجال السيلت الناعم أيضاً كما ورد في الدراسات الحديثة , وبالتالي تعبر الفعّالية المعدّلة عن مؤثرات الإختلاف في تركيب وكمية المينيرالات الغضارية لتربة ما , أي تعبر عن خواص التربة بشكل أفضل وتصف التأثير المتبادل للماء وللمينيرالات الغضارية كمياً.

- **تأثير فعّالية سكيمبتون للعينات على قرينة الإنضغاط**

درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط , و فعّالية (سكيمبتون) بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) لإختيار العلاقة التي تعطي أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأ والأكثر دقة وقد تبين أنه لاتوجد أية علاقة مقبولة فيزيائيا بينهما (الشكل ٤-٣-١٢) , فالعلاقة الخطية من الدرجة الثانية الواردة في هذا الشكل غير مقبولة فيزيائياً بالرغم من معامل الإرتباط الخطي العالي. إلى نفس النتيجة أدت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط (الشكل ٤-٣-١٣).



الشكل (٤-٣-١٢) العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية
(نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة)



الشكل (٤-٣-١٣) العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

- **تأثير الفعّالية المعدّلة للعينات على قرينة الإنضغاط**

بنفس الطريقة درست العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية المعدّلة بإعتبار نتائج جميع تجارب الإنضغاطية المجراة على جميع الأتربة, حيث تم تجريب عدة توابع مختلفة أيضاً (خطية و أسية و لوغارتمية) وتم إختيار العلاقة التي أعطت أفضل معامل إرتباط وبالتالي الأقل خطأً والأكثر دقة وهي العلاقة (٤-٣-١٤) الموضحة في الشكل (٤-٣-١٤), وهي علاقة خطية من الدرجة الأولى ذات معامل إرتباط يساوي٩٩ % تقريباً.

في الطريقة الثانية تمت دراسة العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية المعدّلة للعينة باعتبار نتائج تجارب الإنضغاطية على العينات التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها فقط , حيث تبين أيضاً أن أفضل علاقة خطية بينهما هي العلاقة (٤-٣-١٥) , وهي علاقة ذات معامل إرتباط يساوي 99,9% تقريباً (الشكل ٤-٣-١٥).

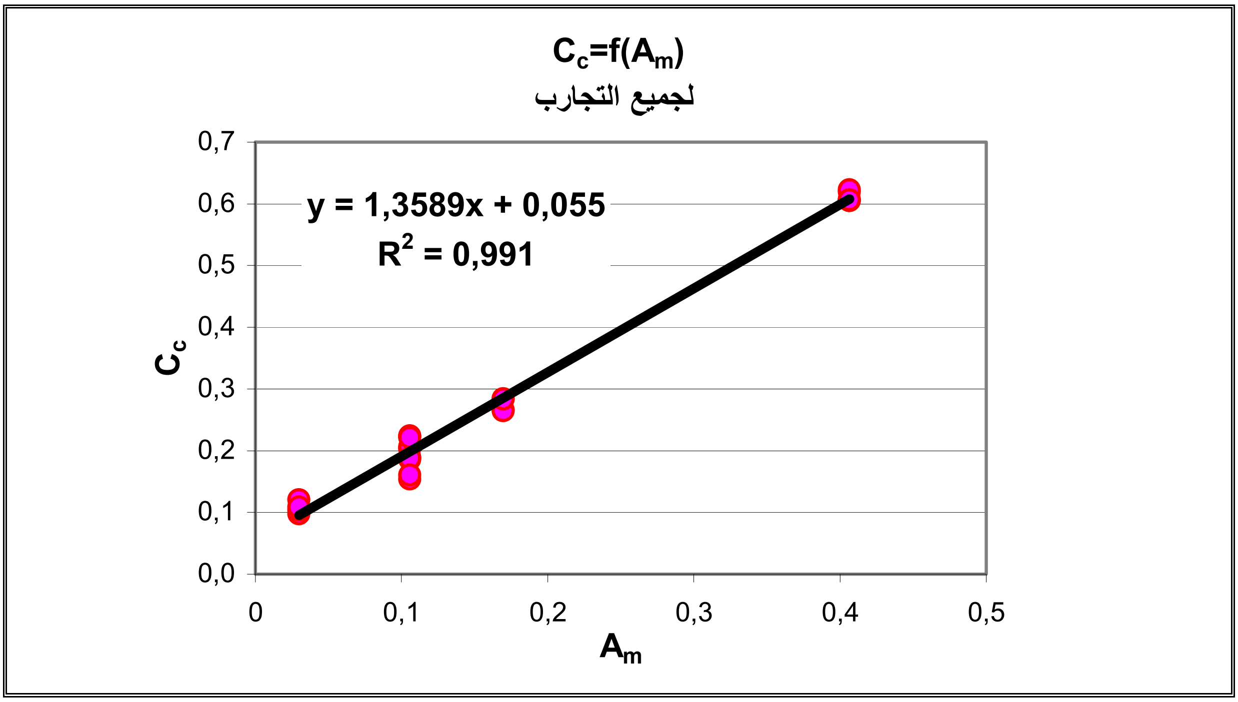
$$C_c = 1,3589 * A_m + 0,055 \quad (R^2 = 0,991)$$ (٤-٣-١٤)

$$C_c = 1,352 * A_m + 0,0547 \quad (R^2 = 0,9989)$$ (٤-٣-١٥)

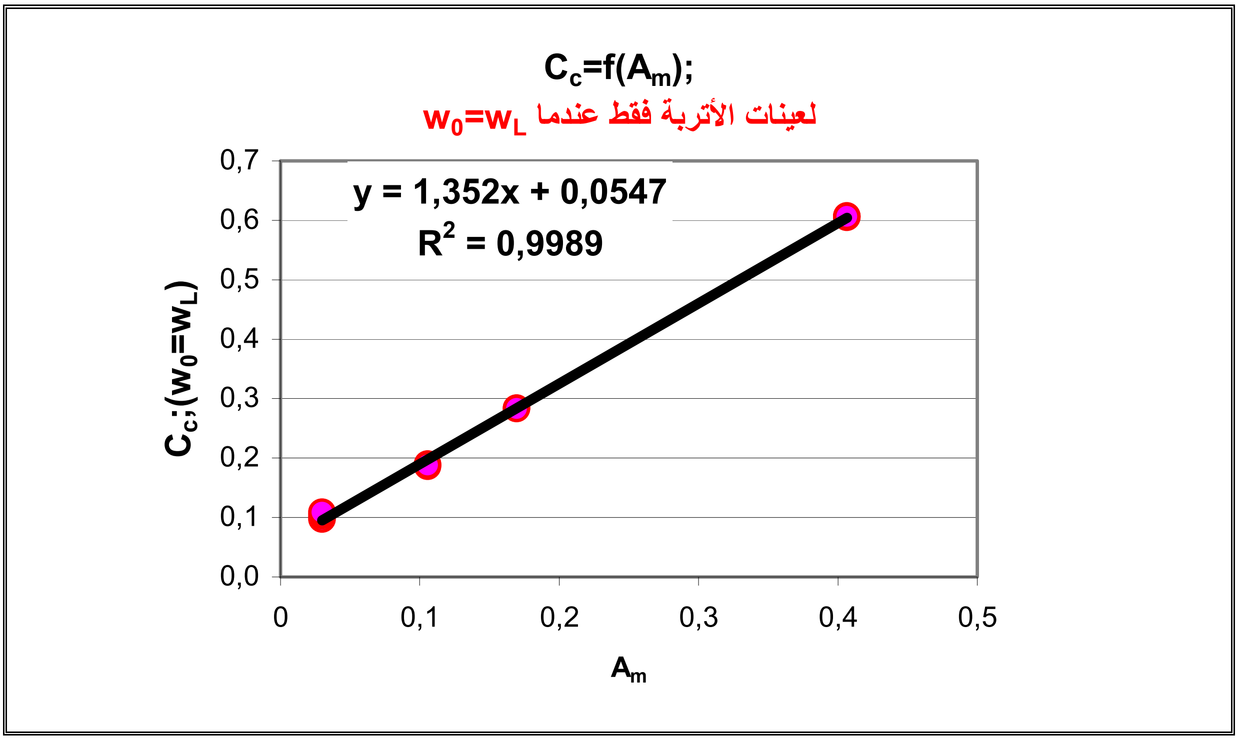
بالطبع لم يكن من الغريب الحصول على هذه الدقة العالية للعلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالفعّالية المعدّلة , باعتبار أن الفعّالية المعدّلة تعبر عن تأثير المنرالات الغضارية الموجودة ضمن السيلت الناعم أيضاً و تأثير حدود آتربرغ (تأثير قرينة اللدونة) على تصرف المادة بشكل أفضل وبالتالي قرينة الإنضغاط.

ولابد هنا أن يذكر أنه قد تم تجريب وضع نسبة الغضار ونسبة النواعم (السيلت والغضارمعاً) في علاقة حساب الفعالية المعدلة عوضاً عن نسبة الغضاروالسيلت الناعم فقط ($d \leq 0,0063$ mm) فلم يتحسن معامل الإرتباط للعلاقات , بل إنخفض بشكل ملحوظ , مما يؤكد إرتباط قرينة الإنضغاط بالفعالية المعدلة (A_m) كنسبة بين مربع قرينة اللدونة ونسبة الغضارمع السيلت الناعم ($d \leq 0,0063$ mm).

☑ يمكن أن نستنتج هنا أيضاً أن دقة العلاقة قد تحسنت عندما وحدت الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما اعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي من ٩٩% إلى ٩٩,٩% تقريباً قارن الشكلين (٤-٣-١٤ و ٤-٣-١٥).
كما أن قرينة الإنضغاط تتأثر بالفعّالية المعدّلة التي تعبر عن تصرف المادة بشكل كبير معامل الإرتباط الخطي الممتاز ٩٩,٩% تقريباً .



الشكل (٤-٣-١٤) العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية المعدّلة
(نتائج جميع التجارب على الأتربة الأربعة)



الشكل (٤-٣-١٥) العلاقة بين قرينة الإنضغاط والفعّالية المعدّلة
(جميع التجارب التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة مساوية لرطوبة حد سيولتها)

٤-٣-٣ دراسة تأثير أكثر من متغير (متحول) على قرينة الإنضغاط

☜ **باعتبار النسبة بين الرطوبة الإبتدائية و رطوبة حد السيولة w_0/w_L**

كما تبين من خلال الدراسات (Azzouz et al., 1976 ; Bowles, 1984) فإن العلاقات المستخدمة لتحديد قرينة الإنضغاط و التي تحتوي على أكثر من عامل (متغير) مستقل مفضلة عن تلك التي تحتوي على متغير واحد , لأخذها المؤثرات المختلفة في عين الإعتبار /٢/ , لذلك سيتم في هذا القسم من الدراسة البحث عن علاقة تحتوي على أكبر عدد ممكن من العوامل (المتغيرات) المؤثرة على قرينة الإنضغاط , ولكن ذلك لن يكون سهلاً , بسبب كثرة وتنوع هذه العوامل من جهة أولى, بحيث يكون من الصعب إدخال جميع العوامل المؤثرة في علاقة واحدة , والبحث عن علاقة غير معقدة قدر الإمكان من جهة أخرى , بحيث تأخذ الخواص المختلفة للتربة بعين الإعتبار بإستخدام أقل عدد ممكن من العوامل , أي العوامل التي يمكن أن تعبر عن أكثر من خاصة في آن واحد , أوتعبر عن عوامل آخرى /7/.
من هذا المنطلق و إعتمادا على نتائج الدراسة التجريبية الواردة في الفقرات السابقة تم إستخدام العوامل ذات التأثير الأكبر على قرينة الإنضغاط والتي تعبر عن خواص المادة بشكل أفضل من خلال إختيارالعلاقات ذات معامل الإرتباط الخطي الأعلى , حيث وجد أن العوامل الأكثر تأثيرا في قرينة الإنضغاط والتي يمكن أن تعبر عن عوامل أخرى أيضا يمكن حصرها في الرطوبة الإبتدائية للعينة وقرينة اللدونة والفعّالية المعدّلة, لذلك ستستخدم هذه العوامل (المؤثرات) لإيجاد علاقة ذات دقة إحصائية مقبولة تربطها معا , وذلك على مرحلتين:

- **المرحلة الأولى** :

الحصول على قيمة قرينة الإنضغاط التي تكون فيها الرطوبة الإبتدائية للعينة تساوي رطوبة حد السيولة فعلاً, فعند تحضير العينات لإجراء التجارب كان من الصعب الحصول على عينة ذات رطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة فعلا و إنما قيمة قريبة منها.

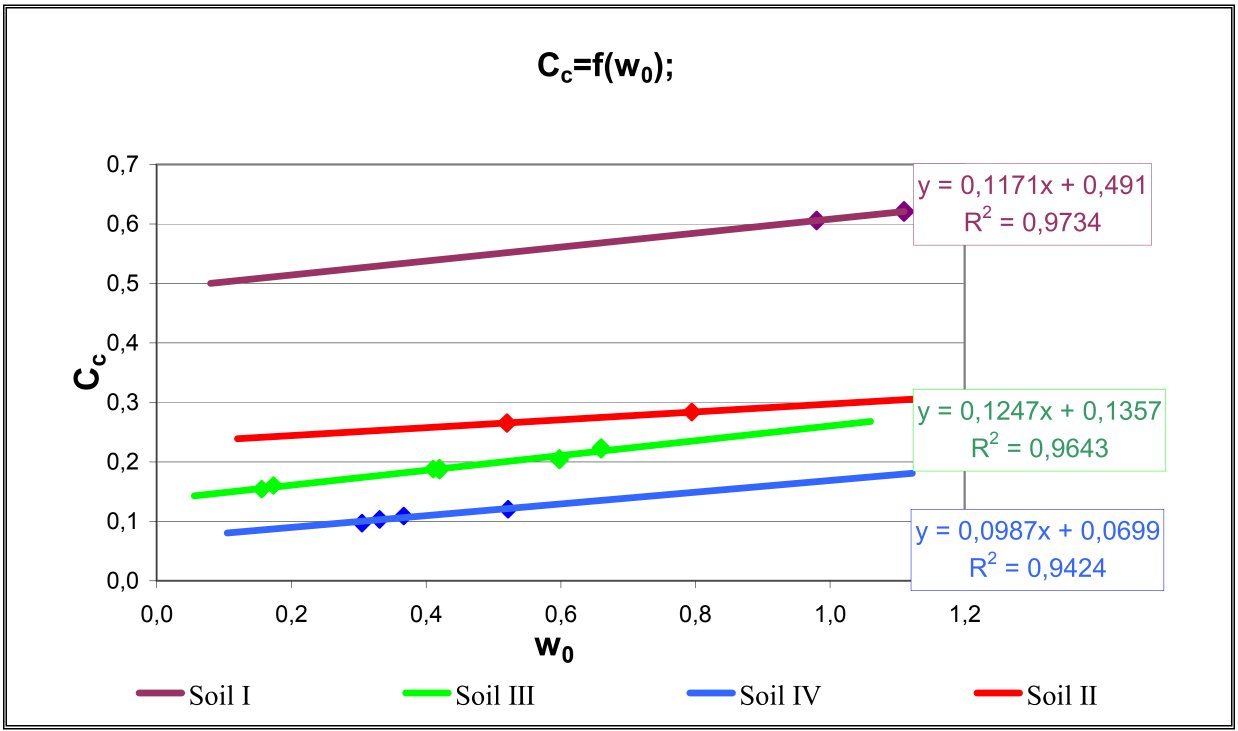
- **المرحلة الثانية:**

دمج تأثير - الرطوبة الإبتدائية و قرينة اللدونة.
- الرطوبة الإبتدائية و الفعّالية المعدّلة.

كما ذكر أعلاه , فقد تم إختيار قرينة اللدونة و الفعّالية المعدّلة باعتبار أنهما أعطيتا أعلى معاملات إرتباط, ولأنهما تدخلان تأثير حد السيولة و حد اللدونة وتعكسا نسبة الغضار و نسبة و نوع المنرالات الغضارية في التربة, وبالتالي تعبرا عن تصرف المادة بشكل أفضل , وكذلك فإن الرطوبة الإبتدائية تعبر عن معامل المسامية الإبتدائي و الذي أعطت علاقته بقرينة الإنضغاط معامل أرتباط عالي أيضا.

١) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و الرطوبة الإبتدائية (لكل تربة)

يبين الشكل (٤-٣-١٦) مخططات ومعادلات العلاقة بين قرينة الإنضغاط والرطوبة الإبتدائية للعينة , وذلك لكل تربة على حدى مع معامل الإرتباط الخطي التابع لها, وبالتالي يمكن من هذه المخططات (أو المعادلات) الحصول على قيمة قرينة الإنضغاط عند رطوبة حد السيولة لتربة ما .



الشكل (٤-٣-١٦) العلاقة بين قرينة الإنضغاط والرطوبة الإبتدائية للعينة (لكل تربة)

كما هو واضح في الشكل فإن قرينة الإنضغاط تتناسب طردا مع زيادة الرطوبة الإبتدائية في التربة, و بالتالي يتضح تأثيرها على قرينة الإنضغاط , وكذلك الأمر بالنسبة لرطوبة حد السيولة , حيث تزداد قرينة الإنضغاط بزيادتها , فالمخططات الأربعة التي تمثل الأترية الأربعة هي تقريباً متوازية, و التربة ذات حد السيولة الأصغر (التربة الرابعة) يمثلها المخطط السفلي , بينما التربة ذات حد السيولة الأعلى مباشرة (التربة الثالثة) يمثلها المخطط الذي فوقه مباشرة , وهكذا حتى المخطط العلوي الممثل للتربة الأولى ذات أعلى حد سيولة بين الأتربة الأربعة , مما يبين أيضاً تأثير حد السيولة الواضح على قرينة الإنضغاط .
يبين الجدول (٤-٣-١) العلاقات الرياضية الخاصة بكل تربة من الأتربة الأربعة والذي يحسب قرينة الإنضغاط بدلالة الرطوبة الإبتدائية لكل تربة :

العلاقة الرياضية	معامل الإرتباط R^2	التربة
$C_c=0,1171 * w_0+0,491$	97%	I
$C_c=0,0668 * w_0+0,2306$	99%	II
$C_c=0,1247 * w_0+0,1357$	96%	III
$C_c=0,0987 * w_0+0,0699$	94%	IV

الجدول (٤-٣-١) العلاقات الرياضية بين قرينة الإنضغاط والرطوبة الإبتدائية

إعتمادا على هذه العلاقات الرياضية (أوالتوابع) الموضحة في الجدول (٤-٣-١) يمكن إيجاد قيمة قرينة الإنضغاط لكل تربة عند الرطوبة الإبتدائية المرادة. من أجل توحيد الشروط الإبتدائية (الرطوبة الإبتدائية) و متابعة الدراسة , عينت قرينة الانضغاط حسب العلاقات أعلاه لأربع رطوبات مختارة وكنسبة من حد السيولة وهي ($0.5*w_L$, w_L , $1.5*w_L$, $2*w_L$) فأعطت القيم المبينة في الجدول (٤-٣-٢)

Soil	$C_{c}_w_{0}=0,5*w_{L}$	$C_{c}_w_{0}=w_{L}$	$C_{c}_w_{0}=1,5*w_{L}$	$C_{c}_w_{0}=2*w_{L}$
Soil I	0,547	0,602	0,658	0,714
Soil II	0,257	0,283	0,310	0,336
Soil III	0,156	0,177	0,197	0,218
Soil IV	0,084	0,099	0,113	0,127

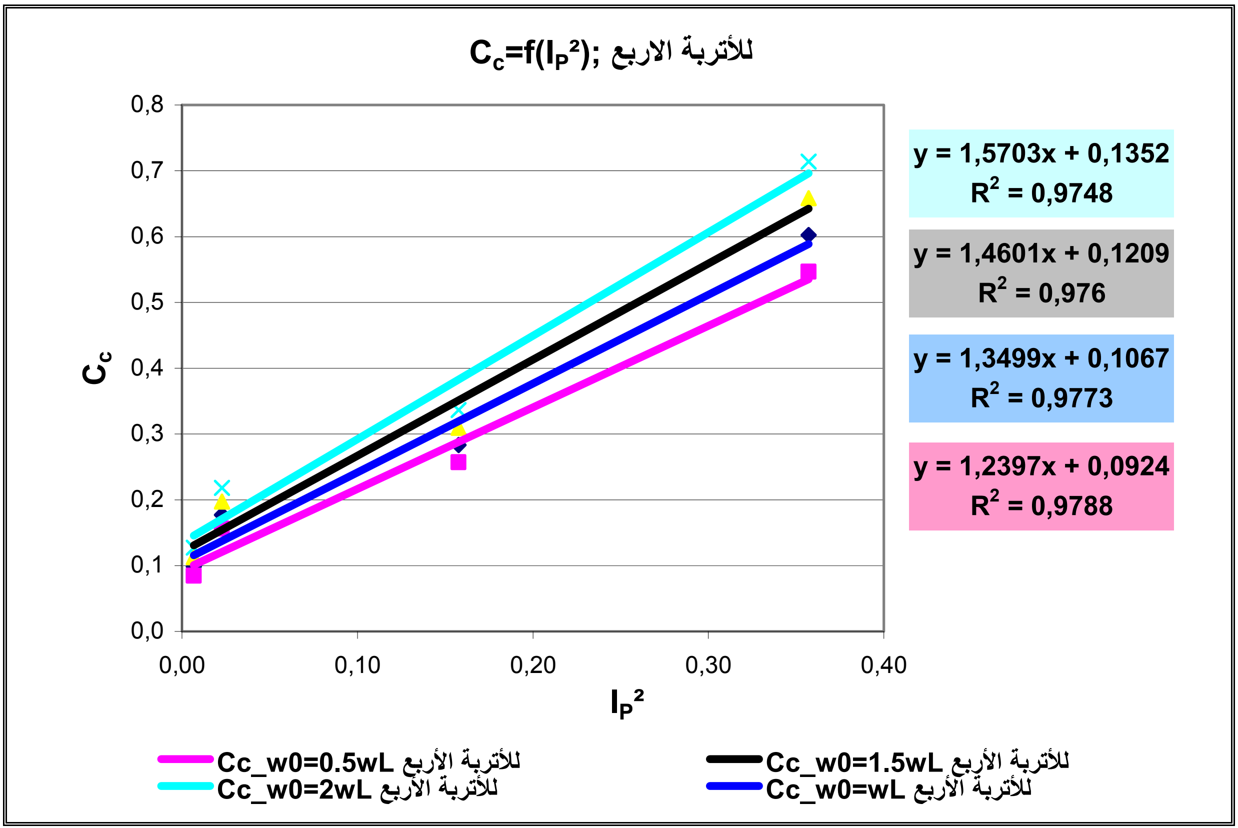
الجدول (٤-٣-٢) قيم قرائن الإنضغاط للأتربة الأربعة الموافقة لقيم الرطوبات الإبتدائية المختارة

٢) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و مربع قرينة اللدونة

☜ باعتبار الرطوبات الإبتدائية المختارة (كنسبة من حد السيولة)

إعتماداً على قيم الجدول (٤-٣-٢) يمكن إيجاد العلاقة بين قرينة الإنضغاط و مربع قرينة اللدونة لكل رطوبة على حدى وللأتربة الاربعة أي لكل عمود من الأعمدة الأربعة في الجدول.

يبين الشكل (٤-٣-١٧) مخططات العلاقة بين قيمة قرينة الإنضغاط المحسوبة أعلاه و مربع قرينة اللدونة , وهي تمثل توابع خطية من الدرجة الأولى , يمثل كل منها العلاقة بينهما عند رطوبة إبتدائية محددة من الرطوبات الأربعة المختارة **($0.5*w_{L}$, w_{L} , $1.5*w_{L}$, $2*w_{L}$).**



الشكل (٤-٣-١٧) مخططات العلاقة بين قرينة الإنضغاط ومربع قرينة اللدونة
(كل منحني يمثل رطوبة إبتدائية محددة مأخوذة كنسبة من حد السيولة)

يبين الجدول التالي (٤-٣-٣) العلاقات الرياضية (التوابع) الناتجة للعلاقة بين قرينة الإنضغاط ومربع قرينة اللدونة عند رطوبة إبتدائية محددة (الشكل ٤-٣-١٧) :

العلاقة الرياضية	معامل الإرتباط R^2	الرطوبة الإبتدائية w_0
C_c=1,2397 I_P^2 + 0,0924	0,9788	**0,5 w_L**
C_c=1,3499 I_P^2 + 0,1067	0,9773	**w_L**
C_c=1,4601 I_P^2 + 0,1209	0,976	**1,5*w_L**
C_c=1,5703 I_P^2 + 0,1352	0,9748	**2*w_L**

الجدول (٤-٣-٣) العلاقات الرياضية بين قرينة الإنضغاط ومربع قرينة اللدونة
(كل علاقة تمثل رطوبة إبتدائية محددة مأخوذة كنسبة من حد السيولة)

كما هو واضح في الجدول (٤-٣-٣) فإن العلاقات الرياضية الأربعة هي من الشكل:

$$C_c = a * I_P^2 + b \quad (٤-٣-١٦)$$

من أجل إيجاد علاقة تربط قرينة الإنضغاط بمربع قرينة اللدونة وبالرطوبة الإبتدائية معا يجب تعيين قيمة الثابتين (a , b) , وهما ثابتان يتغيران بتغير الرطوبة الإبتدائية للعينة (الشكل ٤-٣-١٧).
إعتماداً على الشكل ٤-٣-١٧ والجدول ٤-٣-٣ يمكن استنتاج الجدول التالي (الجدول ٤-٣-٤) الممثل لقيم الثوابت b, a المعلومة و قيم الرطوبات الإبتدائية النسبية الموافقة لها منسوبة إلى رطوبة حد السيولة.

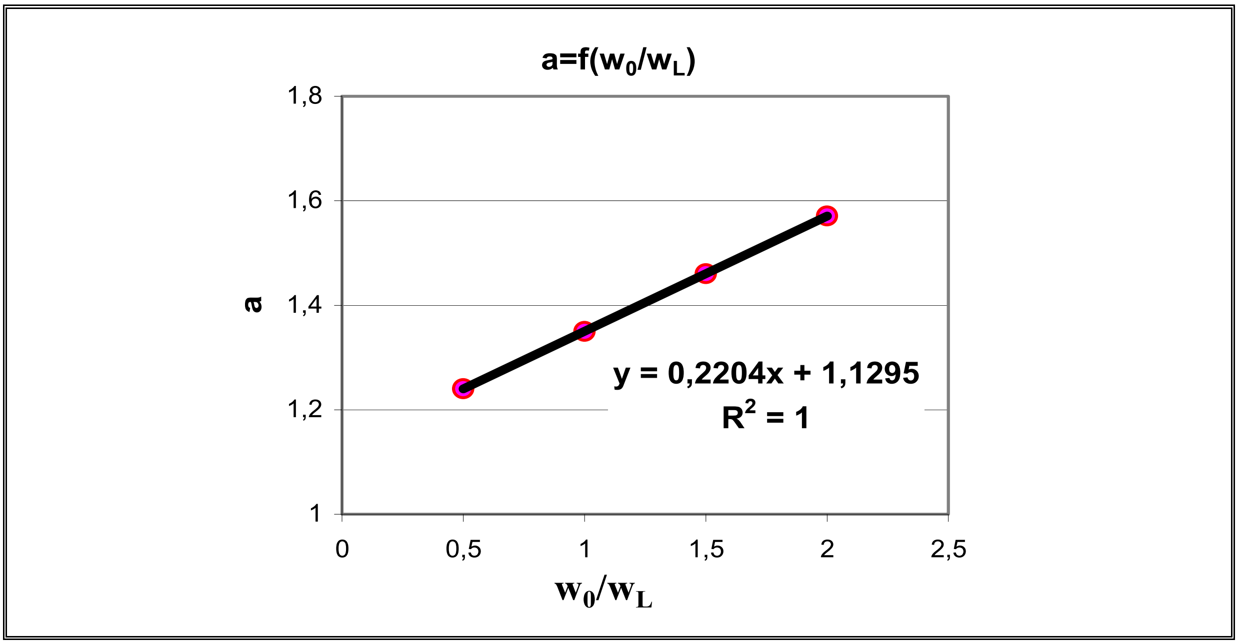
a	b	الرطوبة الإبتدائية النسبية w_0/w_L
1,2397	**0,0924**	**0,5**
1,3499	**0,1067**	**1**
1,4601	**0,1209**	**1,5**
1,5703	**0,1352**	**2**

الجدول (٤-٣-٤) قيم ثوابت التوابع الأربع للعلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بمربع قرينة اللدونة
(عند الرطوبات الإبتدائية المحددة)

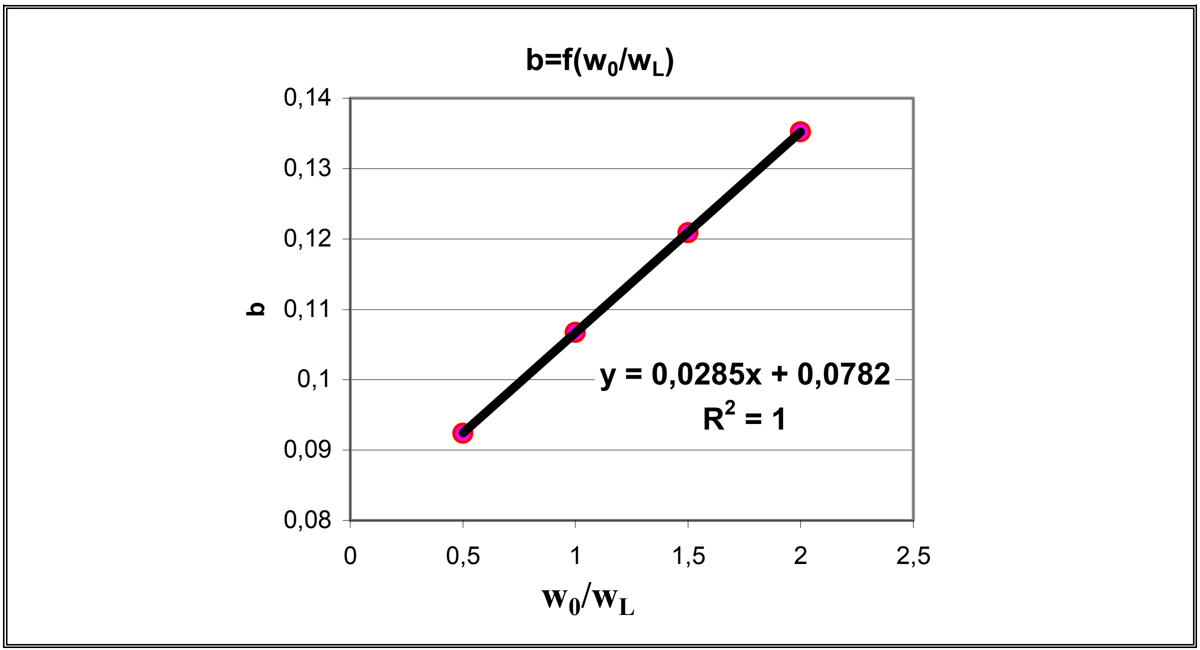
برسم ودراسة العلاقة البيانية بين الثوابت a والرطوبات الإبتدائية النسبية w_0/w_L الموافقة لها (الشكل ٤-٣-١٨) من جهة , وبين الثوابت b والرطوبات الإبتدائية النسبية w_0/w_L الموافقة لها (الشكل ٤-٣-١٩) من جهة أخرى , نحصل على العلاقتين التاليتين (٤-٣-١٧ و٤-٣-١٨) اللتان تحسبان قيمتي a و b

$$a = 0,2204 * (w_0/w_L) + 1,1295 \quad (٤-٣-١٧)$$

$$b = 0{,}0285 * (w_0/w_L) + 0{,}0782 \qquad (٤-٣-١٨)$$



الشكل (٤-٣-١٨) العلاقة بين الثابت a والرطوبة الإبتدائية النسبية w_0/w_L

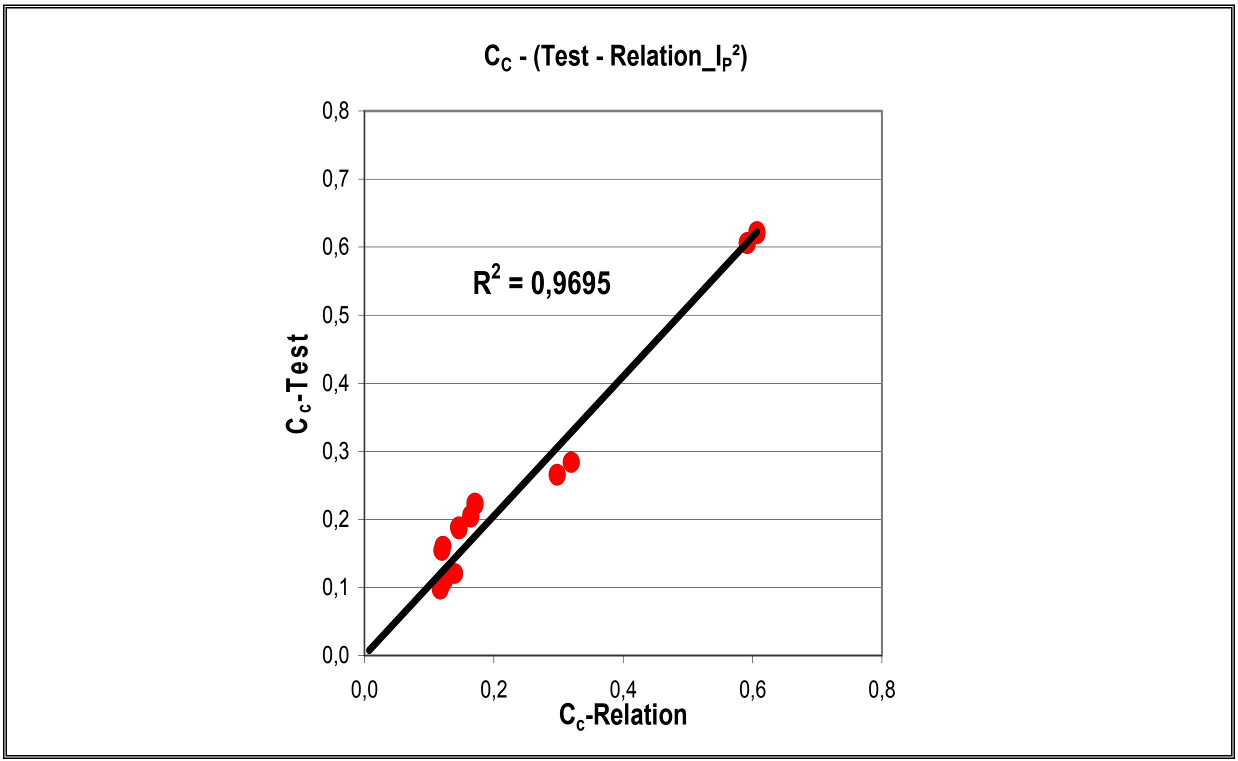


الشكل (٤-٣-١٩) العلاقة بين الثابت b والرطوبة الإبتدائية النسبية w_0/w_L

بتعويض العلاقتين (٤-٣-١٧) و (٤-٣-١٨) في العلاقة (٤-٣-١٦) نحصل على العلاقة (٤-٣-١٩) المطلوبة و التي تحسب لنا قيمة قرينة الإنضغاط كتابع للرطوبة الإبتدائية ولرطوبة حد السيولة و ولمربع قرينة اللدونة في العينة.

$$C_c = (0,2204 * (w_0/w_L) + 1,1295) * I_p^2 + (0,0285 * (w_0/w_L) + 0,0782) \qquad (٤\text{-}٣\text{-}١٩)$$

☑ من أجل تقييم دقة العلاقة السابقة رسمت العلاقة بين قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن التجربة والمحسوبة من هذه العلاقة التجريبية بيانياً (الشكل ٤-٣-٢٠), فوجد أن معامل الإرتباط الخطي فيها يصل إلى ٩٦,٩٥% , وهي دقة ممتازة , أي يمكن القول الآن أنه يمكن حساب قيمة قرينة الإنضغاط لعينة غضارية مشكلة مخبريا بدقة ممتازة وذلك بتجارب بسيطة هي الرطوبة الإبتدائية للعينة و حدود آتربرغ .



الشكل (٤-٣-٢٠) مقارنة بين قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن التجربة و قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن تطبيق العلاقة (٤-٣-١٩)

٣) العلاقة بين قرينة الإنضغاط و الفعّالية المعدّلة

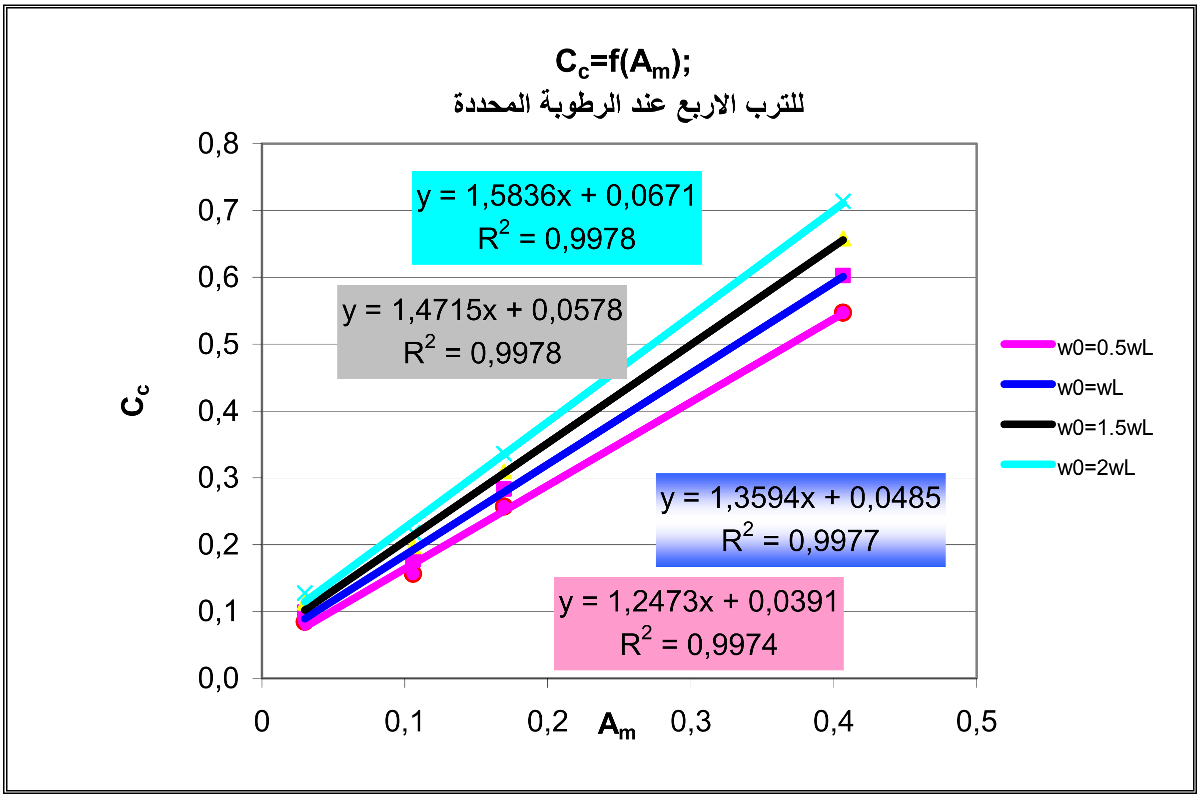
☜ باعتبار الرطوبات الإبتدائية المختارة (كنسبة من حد السيولة)

كما في الفقرة السابقة وبنفس خطوات العمل نقوم بإيجاد علاقة تربط قرينة الإنضغاط بالفعّالية المعدّلة وبالرطوبة الإبتدائية النسبية للعينة

إعتماداً على قيم الجدول (٤-٣-٢) يمكن إيجاد العلاقة بين قرينة الإنضغاط و الفعّالية المعدّلة لكل رطوبة على حدى وللأتربة الاربعة أي لكل عمود من الأعمدة الأربعة في الجدول.

يبين الشكل (٤-٣-٢١) مخططات العلاقة بين قيمة قرينة الإنضغاط (من الجدول ٤-٣-٢) و الفعّالية المعدّلة, وهي تمثل توابع خطية من الدرجة الأولى , يمثل كل منها العلاقة بينهما عند رطوبة إبتدائية محددة من الرطوبات الأربعة المختارة (**$0.5*w_L$, w_L , $1.5*w_L$, $2*w_L$**) .

يبين الجدول التالي (٤-٣-٥) العلاقات الرياضية (التوابع) الناتجة للعلاقة بين قرينة الإنضغاط الفعّالية المعدّلة عند رطوبة إبتدائية محددة (الشكل (٤-٣-٢١) :



الشكل (٤-٣-٢١) يوضح أربع منحنيات لعلاقة قرينة الإنضغاط بالفعّالية المعدّلة
كل منحني يمثل رطوبة واحدة المأخوذة كنسبة من حد السيولة

العلاقة الرياضية	معامل الإرتباط R^2	الرطوبة الإبتدائية w_0
$C_c=1,2473\ A_m + 0,0391$	0,9974	**0,5 w_L**
$C_c=1,3594\ A_m + 0,0485$	0,9977	**w_L**
$C_c=1,4715\ A_m + 0,0578$	0,9978	**1,5*w_L**
$C_c=1,5836\ A_m + 0,0671$	0,9978	**2*w_L**

الجدول (٤-٣-٥) العلاقات الرياضية بين قرينة الإنضغاط والفعّالية المعدّلة
(كل علاقة تمثل رطوبة إبتدائية محددة مأخوذة كنسبة من حد السيولة)

كما هو واضح في الجدول (٤-٣-٥) فإن العلاقات الرياضية الأربعة هي من الشكل:

$$C_c=a*A_m+b \qquad (٤-٣-٢٠)$$

من أجل إيجاد علاقة تربط قرينة الإنضغاط بالفعّالية المعدّلة وبالرطوبة الإبتدائية معا يجب تعيين قيمة الثابتين (a , b) , وهما ثابتان يتغيران بتغير الرطوبة الإبتدائية للعينة (الشكل ٤-٣-٢١).
إعتماداً على الشكل ٤-٣-٢١ والجدول ٤-٣-٥ يمكن استنتاج الجدول التالي (الجدول ٤-٣-٦) الممثل لقيم الثوابت b, a المعلومة و قيم الرطوبات الإبتدائية النسبية الموافقة لها منسوبة إلى رطوبة حد السيولة.

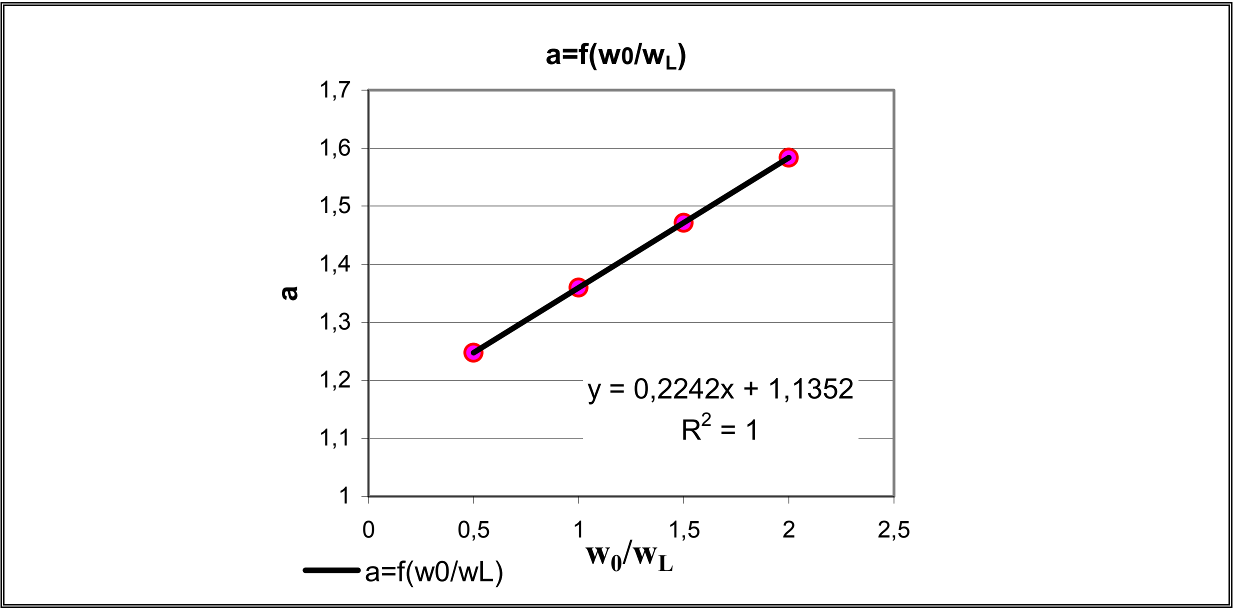
a	b	الرطوبة الإبتدائية النسبية w_0/w_L
1,2473	**0,0391**	**0,5**
1,3594	**0,0485**	**1**
1,4715	**0,0578**	**1,5**
1,5836	**0,0671**	**2**

الجدول (٤-٣-٦) قيم ثوابت التوابع الأربع للعلاقات التي تربط قرينة الإنضغاط بالفعّالية المعدّلة
(عند الرطوبات الإبتدائية المحددة)

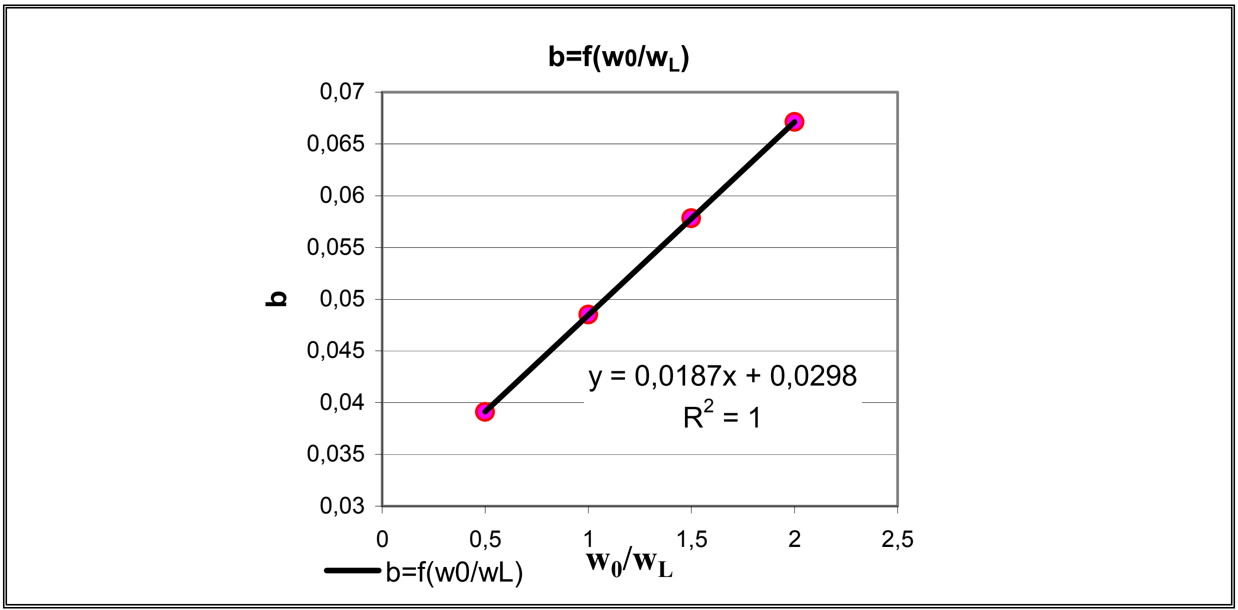
برسم ودراسة العلاقة البيانية بين الثوابت a والرطوبات الإبتدائية النسبية w_0/w_L الموافقة لها (الشكل ٤-٣-٢٢) من جهة , وبين الثوابت b والرطوبات الإبتدائية النسبية w_0/w_L الموافقة لها (الشكل ٤-٣-٢٣) من جهة أخرى , نحصل على العلاقتين التاليتين (٤-٣-٢١ و٤-٣-٢٢) اللتان تحسبان قيمتي a و b

$$a = 0,2242 * (w_0/w_L) + 1,1352 \qquad (٤-٣-٢١)$$

$$b = 0,0187 * (w_0/w_L) + 0,0298 \qquad (٤-٣-٢٢)$$



الشكل (٤-٣-٢٢) العلاقة بين الثابت a والرطوبة الإبتدائية النسبية w_0/w_L

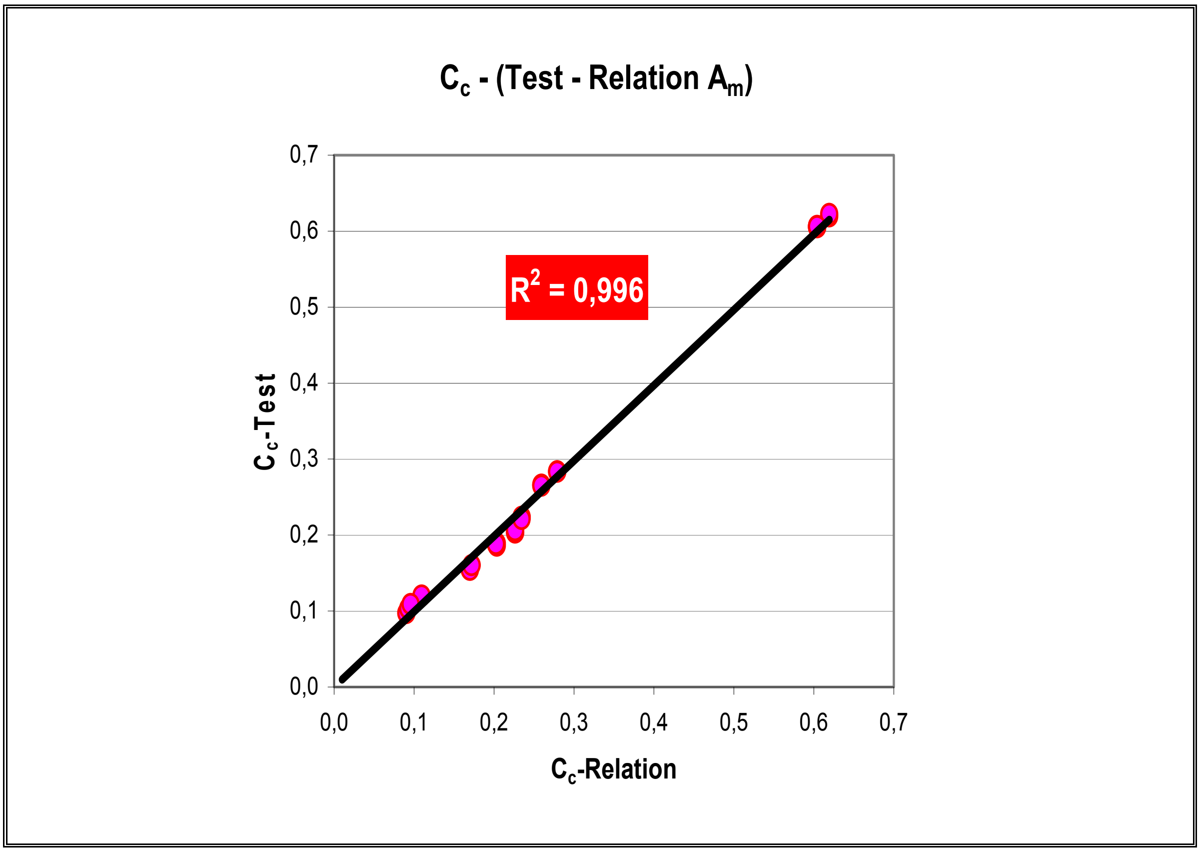


الشكل (٤-٣-٢٣) العلاقة بين الثابت b والرطوبة الإبتدائية النسبية w_0/w_L

بتعويض العلاقتين (٤-٣-٢١) و (٤-٣-٢٢) في العلاقة (٤-٣-٢٠) نحصل على العلاقة (٤-٣-٢٣) المطلوبة و التي تحسب لنا قيمة قرينة الإنضغاط كتابع للرطوبة الإبتدائية ولرطوبة حد السيولة وللفعّالية المعدّلة للعينة.

$$C_c = (0,2242 * (w_0/w_L) + 1,1352)*A_m + (0,0187 * (w_0/w_L) + 0,0298) \qquad (٤-٣-٢٣)$$

☑ من أجل تقييم دقة العلاقة السابقة رسمت العلاقة بين قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن التجربة والمحسوبة من هذه العلاقة التجريبية بيانياً (الشكل ٤-٣-٢٤), فوجد أن معامل الإرتباط الخطي فيها يصل إلى ٩٩,٦% , وهي دقة ممتازة , أي يمكن القول الآن أنه يمكن حساب قيمة قرينة الإنضغاط لعينة غضارية مشكلة مخبريا بدقة ممتازة وذلك بتجارب بسيطة هي الرطوبة الإبتدائية للعينة و حدود آتربرغ , بالإضافة إلى تجربة الترسيب (التركيب الحبي). كما أن هذه العلاقة هي أفضل من العلاقة السابقة (العلاقة ٤-٣-١٩) , التي تعتمد على مربع قرينة اللدونة , إلا أنها تحتاج إلى تجربة الترسيب بشكل إضافي.



الشكل (٤-٣-٢٤) مقارنة بين قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن التجربة و قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن تطبيق العلاقة (٤-٣-٢٣)

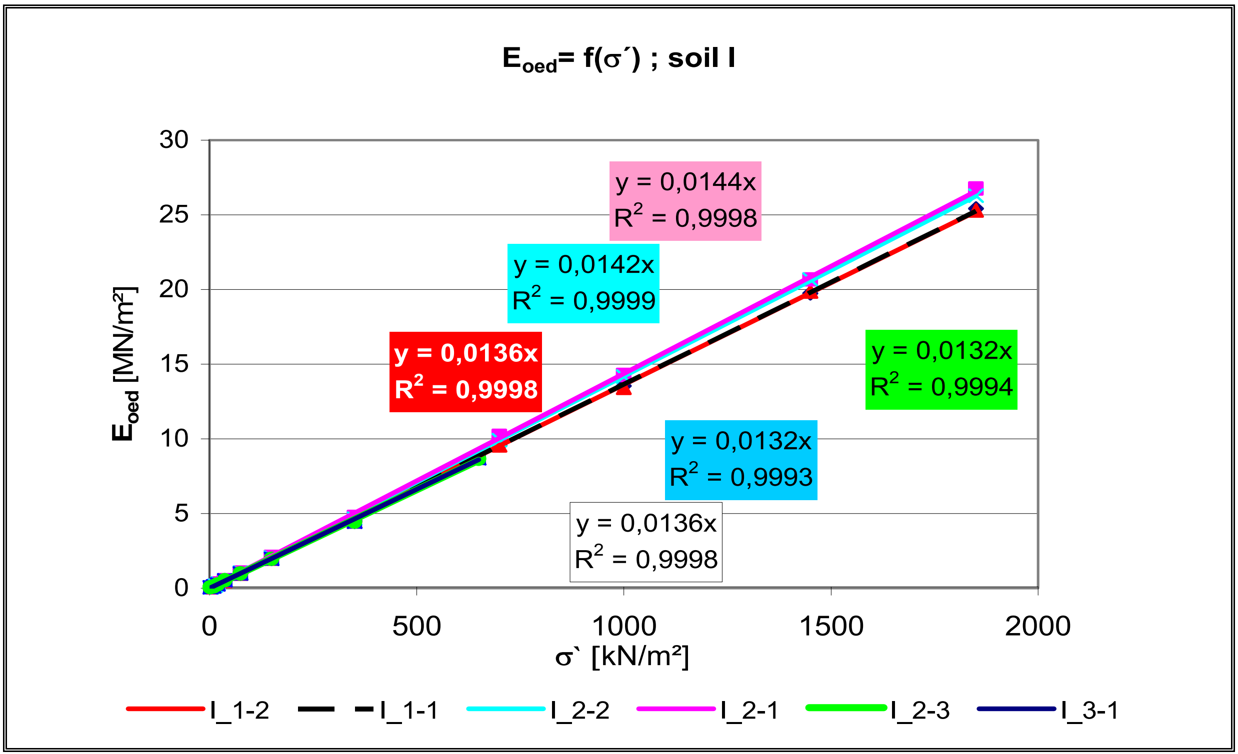
☜ اقترح Terzaghi و Peck بأنه يمكن تعديل معادلة سكيمبتون (العلاقة رقم ٢ في الجدول (٢-٥) و التي تخص أتربة معادة التشكيل بحيث تعكس قرينة الإنضغاط في الأتربة المنضغطة طبيعيا من خلال ضرب العلاقة بمعامل قدره ١,٣ /2/

بالاستفادة من هذه العلاقة يمكن أن نضرب العلاقات التي تحسب قرينة الإنضغاط (مثل العلاقة ٤-٣-٢٣) بالمعامل ١,٣ فتصبح قابلة للتطبيق على الأتربة (السليمة) المنضغطة طبيعيا , لكن هذا يحتاج طبعا لمجموعة من التجارب التي تؤكد لنا صحة هذا الإقتراح أو تنفيه و هذا يحتاج لبحث خاص بالأتربة السليمة.

٤-٣-٤ دراسة تأثير قرينة الإنضغاط و معامل المسامية الإبتدائي على معامل التشوه (الخطي)

- **العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لكل عينة من عينات التربة الأولى)**

يبين الشكل (٤-٣-٢٥) مخططات العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق على العينة , وهي ستة توابع خطية من الدرجة الأولى و محسوبة من العلاقة (٤-١-١), يمثل كل منها نتائج تجربة الإنضغاطية لعينة من العينات الستة المجراة على التربة الأولى , كما يلاحظ من الشكل فإن المخططات تكاد تنطبق على بعضها البعض , لأن الرطوبات الإبتدائية لاتختلف كثيرا عن بعضها البعض .



الشكل (٤-٣-٢٥) العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لعينات التربة الأولى)

يبين الجدول التالي (٤-٣-٧) العلاقات الرياضية (التوابع) الناتجة للعلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق لعينات التربة الأولى :

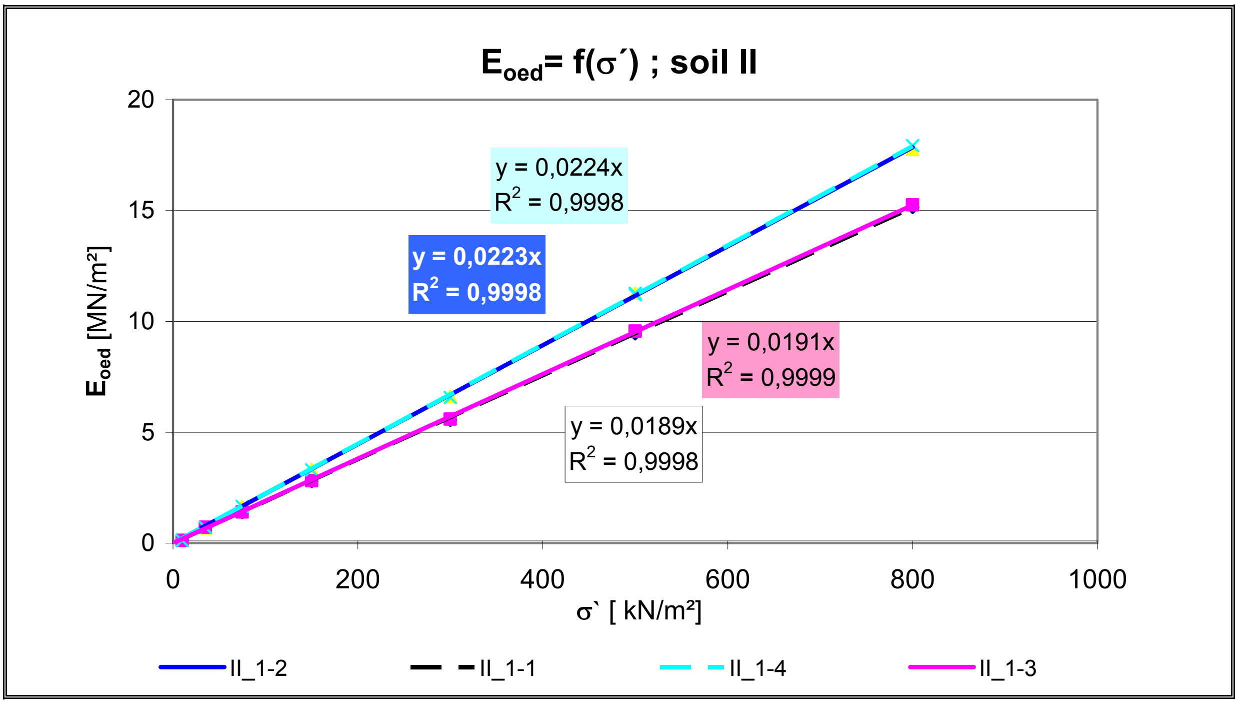
العلاقة	العينة
E_{oed} (MN/m²) =0.0136 *σ´(kN/m²)	I_1-1
E_{oed} (MN/m²) =0.0136 *σ´(kN/m²)	I_1-2
E_{oed} (MN/m²)=0.0144 *σ´(kN/m²)	I_2-1
E_{oed} (MN/m²) =0.0142 *σ´(kN/m²)	I_2-2
E_{oed} (MN/m²) =0.0132 *σ´(kN/m²)	I_2-3
E_{oed} (MN/m²) =0.0132 *σ´(kN/m²)	I_3-1

الجدول (٤-٣-٧) العلاقات الرياضية التي تربط معامل التشوه الخطي بالضغط الفعّال المطبق (كل تابع يخص عينة واحدة من عينات التربة الأولى)

- العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لكل عينة من عينات التربة الثانية)

يبين الشكل (٤-٣-٢٦) مخططات العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق على العينة , وهي أربعة توابع خطية من الدرجة الأولى و محسوبة من العلاقة (٤-١-١), يمثل كل منها نتائج تجربة الإنضغاطية لعينة من العينات الأربعة المجراة على التربة الثانية , كما يلاحظ من الشكل فإن الفرق بين المنحنيات يبدو واضحا أكثر منه في الشكل (٤-٣-٢٥), لأن الرطوبات الإبتدائية أكثر إختلافا منها في عينات التربة الأولى, و نجد أن قيمة معامل التشوه تزداد بزيادة الرطوبة الإبتدائية للعينة.

يبين الجدول التالي (٤-٣-٨) العلاقات الرياضية (التوابع) الناتجة للعلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق لعينات التربة الثانية :



الشكل (٤-٣-٢٦) العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لعينات التربة الثانية)

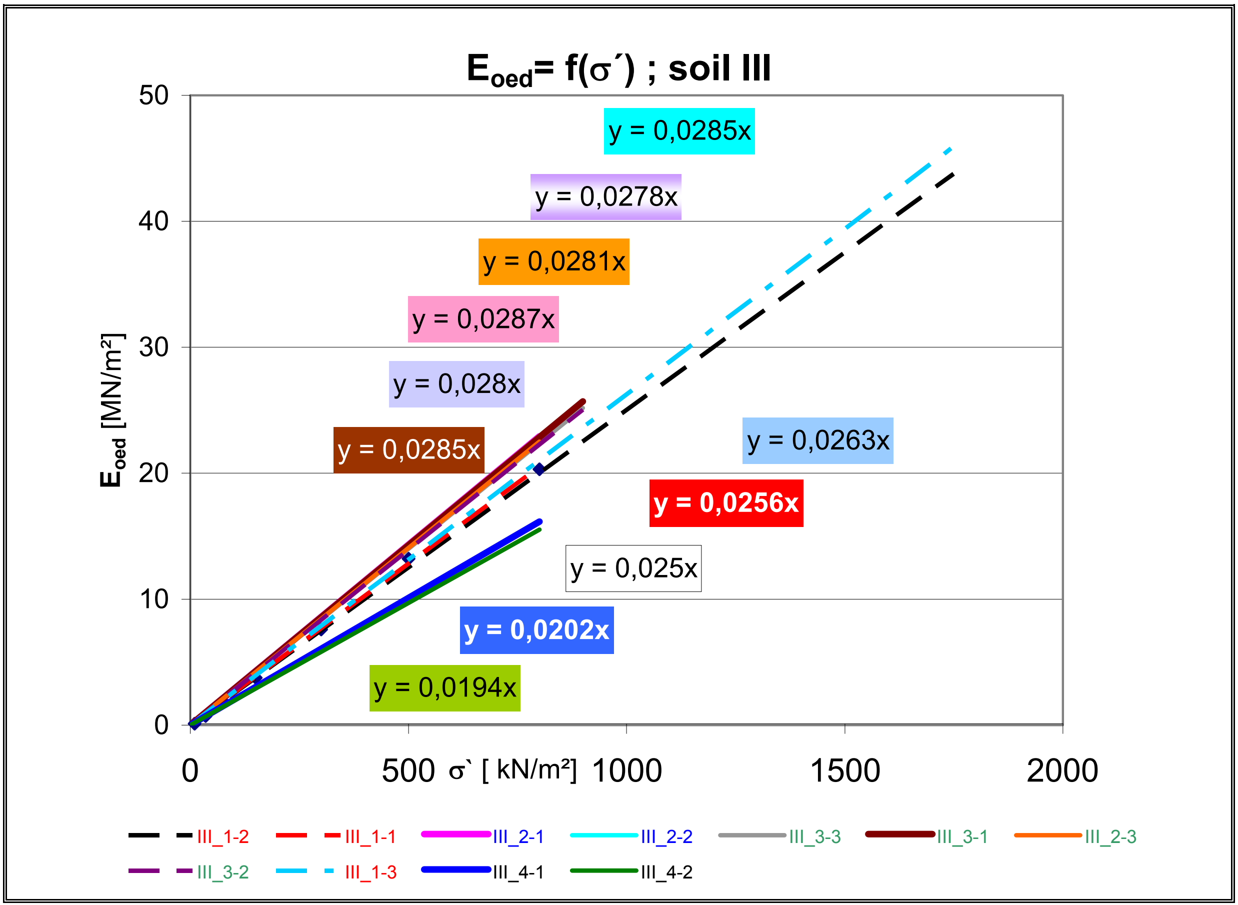
العلاقة	العينة
E_{oed} (MN/m²) =0.0189 *σ´(kN/m²)	II_1-1
E_{oed} (MN/m²) =0.0223 *σ´(kN/m²)	II_1-2
E_{oed} (MN/m²) =0.0191 *σ´(kN/m²)	II_1-3
E_{oed} (MN/m²) =0.0224 *σ´(kN/m²)	II_1-4

الجدول (٤-٣-٨) العلاقات الرياضية التي تربط معامل التشوه الخطي بالضغط الفعّال المطبق (كل تابع يخص عينة واحدة من عينات التربة الثانية)

- **العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لكل عينة من عينات التربة الثالثة)**

يبين الشكل (٤-٣-٢٧) مخططات العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق على العينة , وهي أحد عشرة تابع خطي من الدرجة الأولى و محسوبة من العلاقة (٤-١-١), يمثل كل منها نتائج تجربة الإنضغاطية لعينة من العينات الأربعة المجراة على التربة الثانية , كما يلاحظ من الشكل فإن الفرق بين المنحنيات يبدو واضحا أكثر منه في الشكل (٤-٣-٢٥), لأن الرطوبات الإبتدائية أكثر إختلافا منها في عينات التربة الأولى , و نجد أن قيمة معامل التشوه تزداد بزيادة الرطوبة الإبتدائية للعينة.

يبين الجدول التالي (٤-٣-٩) العلاقات الرياضية (التوابع) الناتجة للعلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق لعينات التربة الثالثة :



الشكل (٤-٣-٢٧) العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لعينات التربة الثالثة)

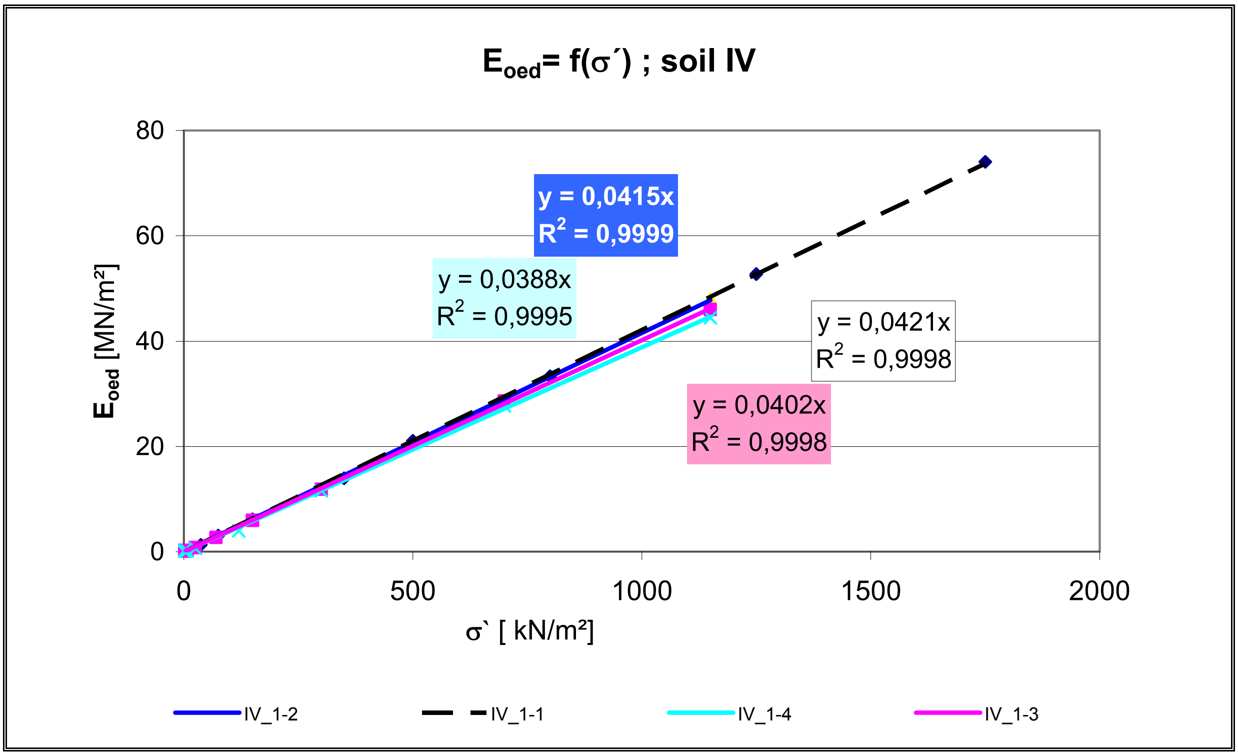
العلاقة	العينة
E_{oed} (MN/m²) =0.0256 *σ´(kN/m²)	III_1-1
E_{oed} (MN/m²) =0.025 *σ´(kN/m²)	III_1-2
E_{oed} (MN/m²) =0.0263 *σ´(kN/m²)	III_1-3
E_{oed} (MN/m²) =0.0287 *σ´(kN/m²)	III_2-1
E_{oed} (MN/m²) =0.0285 *σ´(kN/m²)	III_2-2
E_{oed} (MN/m²) =0.0281 *σ´(kN/m²)	III_2-3
E_{oed} (MN/m²) =0.0285 *σ´(kN/m²)	III_3-1
E_{oed} (MN/m²) =0.0281 *σ´(kN/m²)	III_3-2
E_{oed} (MN/m²) =0.028 *σ´(kN/m²)	III_3-3
E_{oed} (MN/m²) =0.0202 *σ´(kN/m²)	III_4-1
E_{oed} (MN/m²) =0.0194 *σ´(kN/m²)	III_4-2

الجدول (٤-٣-٩) العلاقات الرياضية التي تربط معامل التشوه الخطي بالضغط الفعّال المطبق (كل تابع يخص عينة واحدة من عينات التربة الثالثة)

- **العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لكل عينة من عينات التربة الرابعة)**

يبين الشكل (٤-٣-٢٨) مخططات العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق على العينة , أربعة توابع خطية من الدرجة الأولى و محسوبة من العلاقة (٤-١-١), يمثل كل منها نتائج تجربة الإنضغاطية لعينة من العينات الأربعة المجراة على التربة الرابعة, كما يلاحظ أن قيمة معامل التشوه تزداد بزيادة الرطوبة الإبتدائية للعينة.

يبين الجدول التالي (٤-٣-١٠) العلاقات الرياضية (التوابع) الناتجة للعلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق لعينات التربة الرابعة :



الشكل (٤-٣-٢٨) العلاقة بين معامل التشوه الخطي و الضغط الفعّال المطبق (لعينات التربة الرابعة)

العلاقة	العينة
E_{oed} (MN/m²) =0.0421 *σ´(kN/m²)	IV_1
E_{oed} (MN/m²) =0.0415 *σ´(kN/m²)	IV_2
E_{oed} (MN/m²) =0.0402 *σ´(kN/m²)	IV_3
E_{oed} (MN/m²) =0.0388 *σ´(kN/m²)	IV_4

الجدول (٤-٣-١٠) العلاقات الرياضية التي تربط معامل التشوه الخطي بالضغط الفعّال المطبق (كل تابع يخص عينة واحدة من عينات التربة الرابعة)

- **معامل التشوه الخطي كتابع للضغط الفعّال المطبق وقرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي**

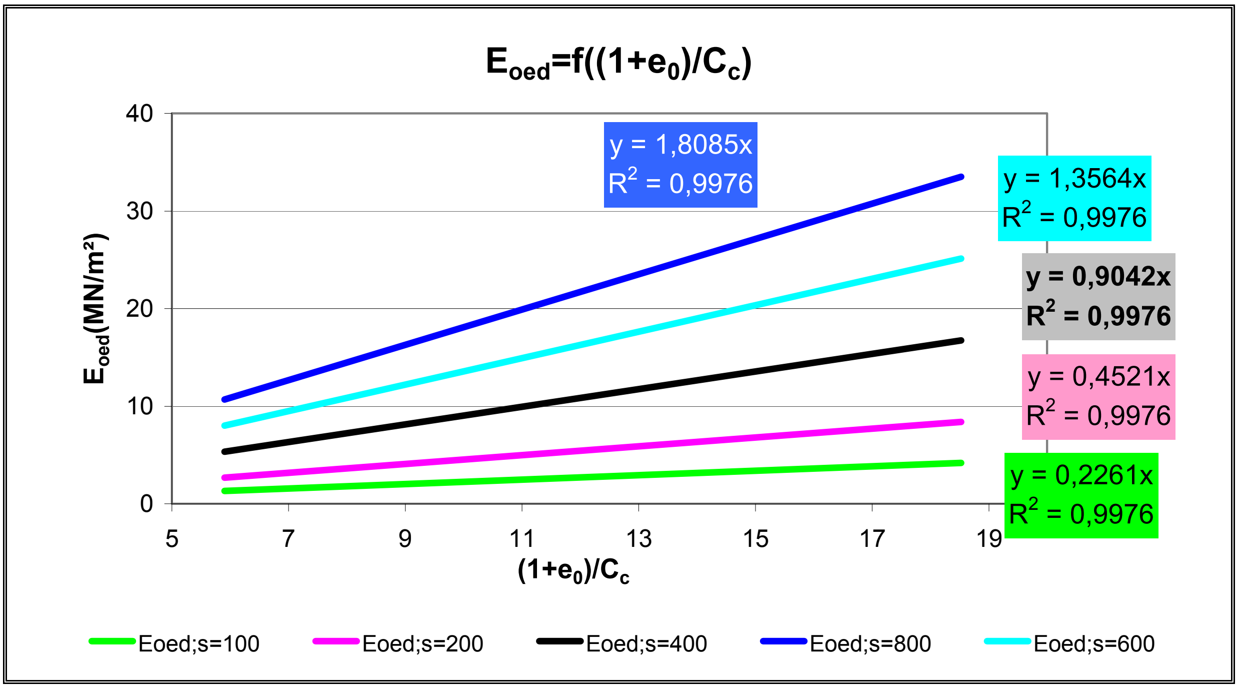
استناداً إلى العلاقات الواردة في الجداول (من ٤-٣-٧ إلى ٤-٣-١٠) لحساب معامل التشوه الخطي بدلالة الضغط الفعّال المطبق (لجميع العينات والأتربة) ومن أجل توحيد الشروط نحسب قيم معامل التشوه لكل عينة وعند ضغوط محددة هي (100, 200, 400, 600, 800 kN/m²) , حيث يكفي دراسة العلاقات ضمن هذا المجال من الضغوط (الإجهادات) بسبب كون العلاقة خطية من الدرجة الأولى بين معامل التشوه والضغط المطبق معامل التشوه المحسوب عند الضغط [200 [kN/m² يساوي ضعف معامل التشوه المحسوب عند الضغط [100 [kN/m² وهكذا.

وبناء على نتائج الدراسات السابقة في المراجع المختلفة /33/ ,/37/ ,/38/ والتي تحسب معامل التشوه كتابع لقرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي من خلال العامل أو الحد (C_c /$(1+e_0)$) كما هو مبين في الجدولين (٢-٣-١ و ٢-٣-٢) يمكن تشكيل الجدول التالي (٤-٣-١١) والذي يبين قيم معاملات التشوه لجميع العينات عند هذه الضغوط المختارة وقيم الحد (C_c /$(1+e_0)$) الموافقة لها:

العينة	E_{oed} [MN/m²]					$(1+e_0)/C_c$
	σ´ [kN/m²]					
	100	200	400	600	800	
I_1-1	1,36	2,72	5,44	8,16	10,88	5,972
I_1-2	1,36	2,72	5,44	8,16	10,88	5,951
I_2-1	1,44	2,88	5,76	8,64	11,52	6,299
I_2-2	1,42	2,84	5,68	8,52	11,36	6,181
I_2-3	1,32	2,64	5,28	7,92	10,56	5,904
I_3-1	1,32	2,64	5,28	7,92	10,56	5,913
II_1-1	1,89	3,78	7,56	11,34	15,12	8,370
II_1-2	2,23	4,46	8,92	13,38	17,84	9,970
II_1-3	1,91	3,82	7,64	11,46	15,28	8,426
II_1-4	2,24	4,48	8,96	13,44	17,92	9,891
III_1-1	2,56	5,12	10,24	15,36	20,48	11,426
III_1-2	2,5	5	10	15	20	11,209
III_2-1	2,87	5,74	11,48	17,22	22,96	12,762
III_2-2	2,85	5,7	11,4	17,1	22,8	12,738
III_2-3	2,81	5,62	11,24	16,86	22,48	12,470
III_3-1	2,85	5,7	11,4	17,1	22,8	12,340
III_3-2	2,78	5,56	11,12	16,68	22,24	12,201
III_3-3	2,8	5,6	11,2	16,8	22,4	12,260
III_1-3	2,63	5,26	10,52	15,78	21,04	11,076
III_4-1	2,02	4,04	8,08	12,12	16,16	9,121
III_4-2	1,94	3,88	7,76	11,64	15,52	9,059
IV_1-1	4,21	8,42	16,84	25,26	33,68	18,525
IV_1-2	4,15	8,3	16,6	24,9	33,2	18,123
IV_1-3	4,02	8,04	16,08	24,12	32,16	17,923
IV_1-4	3,88	7,76	15,52	23,28	31,04	17,398

الجدول (٤-٣-١١) قيم معامل التشوه الخطي (MN/m²) وقيم العامل C_c/ $(1+e_0)$ الموافق لها (لكل عينة عند الضغوط المختارة)

إعتماداً على الجدول (٤-٣-١١) , نرسم العلاقة بين معامل التشوه الخطي و قيمة العامل $((1+e_0)/C_c)$, فنحصل على خمسة توابع (الشكل ٤-٣-٢٩), ينتج كل منها عن تطبيق أحد الضغوط المختارة (100, 200, 400, 600, 800 kN/m²) , ومن ثم نقوم بتشكيل الجدول التالي للعلاقات الناتجة (الجدول ٤-٣-١٢):



الشكل (٤-٣-٢٩) العلاقة بين معامل التشوه الخطي (MN/m²) و قيم العامل $(1+e_0)/C_c$ الموافقة للضغوط المختارة (100, 200, 400, 600, 800 kN/m²)

العلاقة	الضغط σ´ [kN/m²]
E_{oed} (MN/m²) $=0.2261*((1+e_0)/C_c)$	100
E_{oed} (MN/m²) $=0.4521*((1+e_0)/C_c)$	200
E_{oed} (MN/m²) $=0.9042*((1+e_0)/C_c)$	400
E_{oed} (MN/m²) $=1.3564*((1+e_0)/C_c)$	600
E_{oed} (MN/m²) $=1.8085*((1+e_0)/C_c)$	800

الجدول (٤-٣-١٢) العلاقات التي تحسب قيم معامل التشوه الخطي (MN/m²) **(حسب قيمة الضغط المطبق (100, 200, 400, 600, 800 kN/m²))**

كما هو واضح في الجدول (٤-٣-١٢) فإن العلاقات الرياضية الخمسة هي من الشكل:

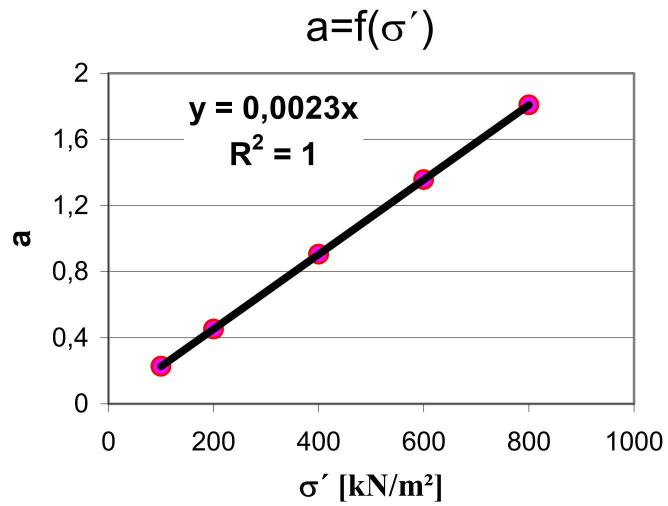
$$E_{oed}=a*((1+e_0)/C_c) \quad (٤-٣-٢٤)$$

برسم ودراسة العلاقة البيانية بين الثوابت a والضغوط المختارة الموافقة لها (الشكل ٤-٣-٣٠ والجدول ٤-٣-١٣) نحصل على العلاقة التالية (٤-٣-٢٥) اللتي تحسب قيمة a :

$$a = 0{,}0023 * \sigma' \qquad (٤-٣-٢٥)$$

σ´ [kN/m²]	a
100	0,22606
200	0,45212
400	0,90424
600	1,35636
800	1,80848

الجدول (٤-٣-١٣) قيم الثوابت a للعلاقة بين معامل التشوه الخطي و العامل $(1+e_0)/C_c$



الشكل (٤-٣-٣٠) العلاقة بين الثوابت a و الضغوط الموافقة لها

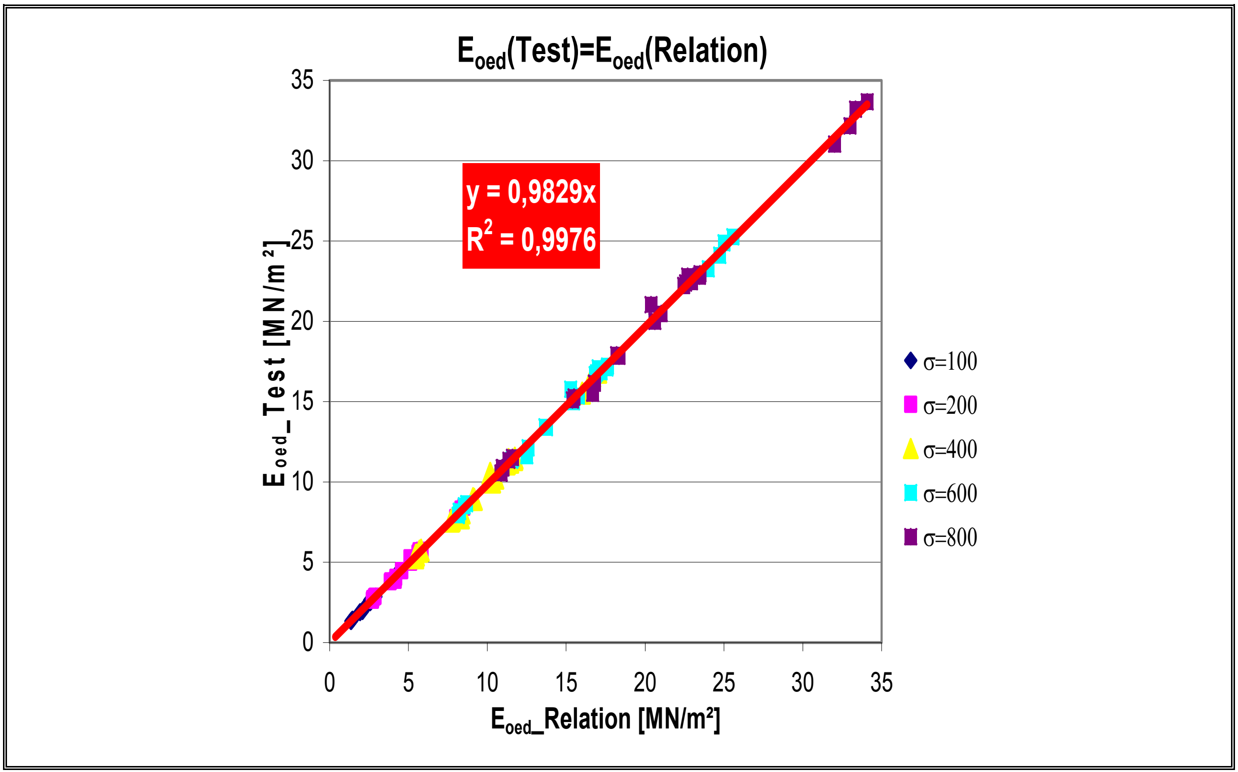
بتعويض العلاقة (٤-٣-٢٥) في العلاقة (٤-٣-٢٤) نحصل على العلاقة (٤-٣-٢٦) المطلوبة و التي تحسب لنا قيمة معامل التشوه كتابع لقرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي وكذلك للضغط الفعّال المطبق:

$$E_{oed}\ [MN/m^2] = (0{,}0023*\sigma')*((1+e_0)/C_c) \qquad (٤-٣-٢٦)$$

وهي علاقة توافق العلاقة التالية المقترحة في المراجع (Gudehus /37/) ولكن بإعتبار أن الضغط هنا يعطى ب MN/m^2

$$E_{oed} = ((1+e_0)/C_c) * \ln 10 * \sigma'_m$$

☑ من أجل تقييم دقة العلاقة السابقة رسمت العلاقة بين قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن التجربة والمحسوبة من هذه العلاقة التجريبية بيانياً (الشكل ٤-٣-٣١), فوجد أن معامل الإرتباط الخطي فيها يصل إلى ٩٩,٨% , وهي دقة ممتازة , أي يمكن القول أنه يمكن حساب قيمة معامل التشوه من العلاقة السابقة بدقة ممتازة كتابع للضغط الفعّال المطبق وقرينة الإنضغاط ومعامل المسامية الإبتدائي , طبعا إذا كانت قيم قرينة الإنضغاط ذات دقة مقبولة أيضاً.



الشكل (٤-٣-٣١) العلاقة بين قيم معامل التشوه الخطي (MN/m^2) الناتجة عن التجربة و قيم معامل التشوه الناتجة عن تطبيق العلاقة (٤-٣-٢٦)

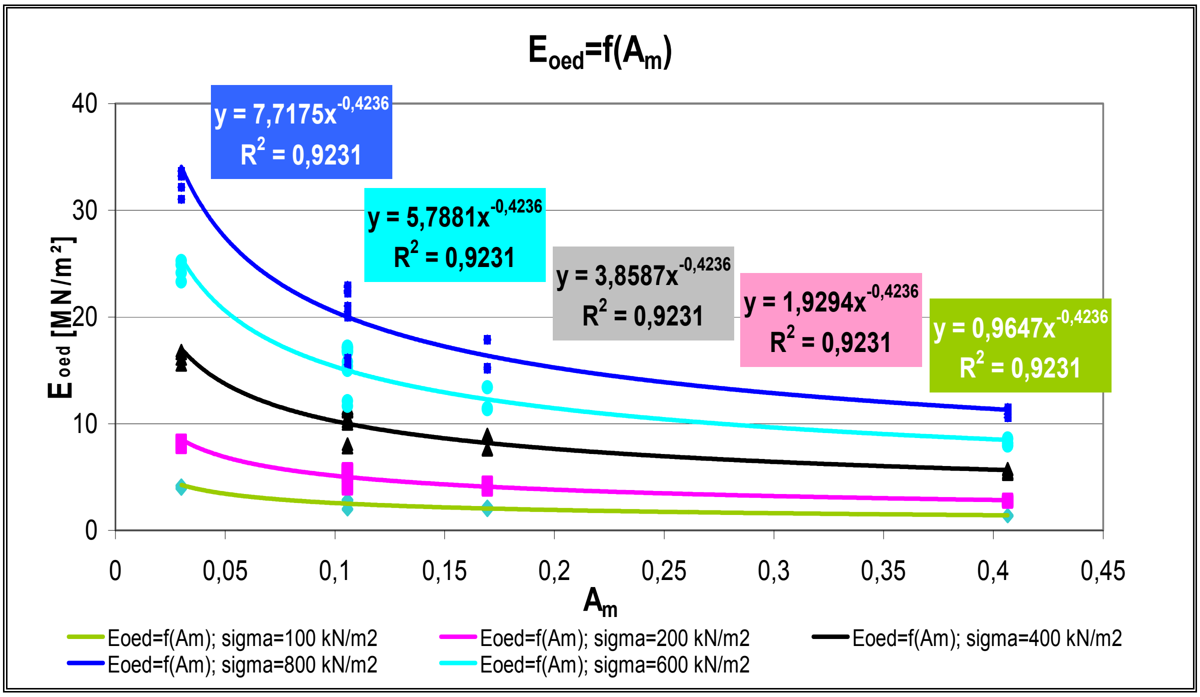
٤-٣-٥ دراسة تأثير الفعّالية المعدّلة على معامل التشوه الخطي

بنفس الطريقة السابقة لدراسة العلاقة بين معامل التشوه والعامل $(1+e_0)/C_c$, ندرس العلاقة بين معامل التشوه و الفعّالية المعدّلة A_m.

بالاستعانة بالجدول ٤-٣-١٤ نرسم العلاقة بين معامل التشوه و الفعّالية المعدّلة A_m وذلك عند كل قيمة للضغوط المختارة (100, 200, 400, 600, 800 kN/m²) على حدى , فنحصل على خمسة توابع (الشكل ٤-٣-٣٢) , ينتج كل منها من قيمة معامل التشوه الناتجة عن تطبيق ضغط محدد من الضغوط المختارة (100, 200, 400, 600, 800 kN/m²) , ومن ثم نقوم بتشكيل الجدول التالي للعلاقات الناتجة (الجدول ٤-٣-١٥):

العينة	A_m	E_{oed} [MN/m²]				
		σ´ [kN/m²]				
		100	**200**	**400**	**600**	**800**
I_1-1	0,407	1,36	2,72	5,44	8,16	10,88
I_1-2	0,407	1,36	2,72	5,44	8,16	10,88
I_2-1	0,407	1,44	2,88	5,76	8,64	11,52
I_2-2	0,407	1,42	2,84	5,68	8,52	11,36
I_2-3	0,407	1,32	2,64	5,28	7,92	10,56
I_3-1	0,407	1,32	2,64	5,28	7,92	10,56
II_1-1	0,1695	1,89	3,78	7,56	11,34	15,12
II_1-2	0,1695	2,23	4,46	8,92	13,38	17,84
II_1-3	0,1695	1,91	3,82	7,64	11,46	15,28
II_1-4	0,1695	2,24	4,48	8,96	13,44	17,92
III_1-1	0,1057	2,56	5,12	10,24	15,36	20,48
III_1-2	0,1057	2,50	5,00	10,00	15,00	20,00
III_2-1	0,1057	2,87	5,74	11,48	17,22	22,96
III_2-2	0,1057	2,85	5,7	11,40	17,10	22,80
III_2-3	0,1057	2,81	5,62	11,24	16,86	22,48
III_3-1	0,1057	2,85	5,70	11,40	17,10	22,8
III_3-2	0,1057	2,78	5,56	11,12	16,68	22,24
III_3-3	0,1057	2,80	5,60	11,20	16,80	22,40
III_1-3	0,1057	2,63	5,26	10,52	15,78	21,04
III_4-1	0,1057	2,02	4,04	8,08	12,12	16,16
III_4-2	0,1057	1,94	3,88	7,76	11,64	15,52
IV_1-1	0,03002	4,21	8,42	16,84	25,26	33,68
IV_1-2	0,03002	4,15	8,30	16,60	24,90	33,20
IV_1-3	0,03002	4,02	8,04	16,08	24,12	32,16
IV_1-4	0,03002	3,88	7,76	15,52	23,28	31,04

الجدول (٤-٣-١٤) قيم معامل التشوه الخطي (MN/m²) و قيم الفعّالية المعدّلة A_m الموافقة لها (لكل عينة عند الضغوط المختارة)



الشكل (٤-٣-٣٢) العلاقة بين معامل التشوه الخطي (MN/m^2) والفعّالية المعدّلة الموافقة للضغوط المختارة ($100, 200, 400, 600, 800\ kN/m^2$)

العلاقة	الضغط kN/m^2
$E_{oed}=0,9647*A_m^{-0,4236}$	100
$E_{oed}=1,9294*A_m^{-0,4236}$	200
$E_{oed}=3,8587*A_m^{-0,4236}$	400
$E_{oed}=5,7881*A_m^{-0,4236}$	600
$E_{oed}=7,7175*A_m^{-0,4236}$	800

الجدول (٤-٣-١٥) العلاقات التي تحسب قيم معامل التشوه الخطي (MN/m^2) كتابع للفعّالية المعدّلة حسب قيمة الضغط المطبق ($100, 200, 400, 600, 800\ kN/m^2$))

كما هو واضح في الجدول (٤-٣-١٥) فإن العلاقات الرياضية الخمسة هي من الشكل:

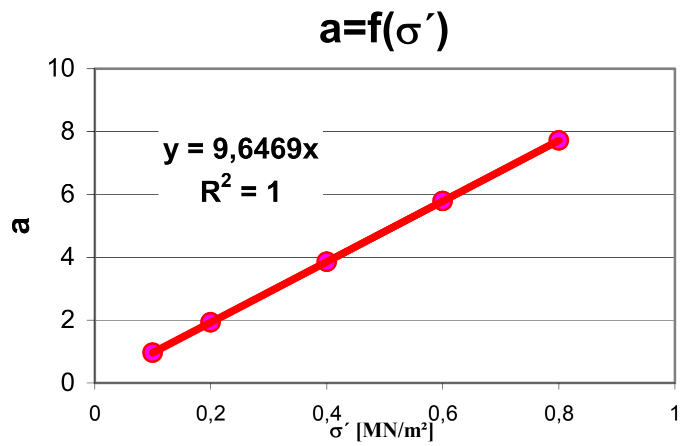
$$E_{oed}=a*(A_m)^{-0,4236} \qquad (٤-٣-٢٧)$$

برسم ودراسة العلاقة البيانية بين الثوابت a والضغوط المختارة الموافقة لها (الشكل ٤-٣-٣٣ والجدول ٤-٣-١٦) نحصل على العلاقة التالية (٤-٣-٢٨) اللتي تحسب قيمة a :

$$a = 9,647 * \sigma'$$ (٤-٣-٢٨)

σ´ [MN/m²]	a
0,8	7,7175
0,6	5,7881
0,4	3,8587
0,2	1,9294
0,1	0,9647

الجدول (٤-٣-١٦) قيم الثوابت a للعلاقة بين معامل التشوه الخطي و الفعّالية المعدّلة



الشكل (٤-٣-٣٣) يوضح العلاقة بين الثابت a و الإجهادات الموافقة له المأخوذة من الجدول (٤-٣-١٦)

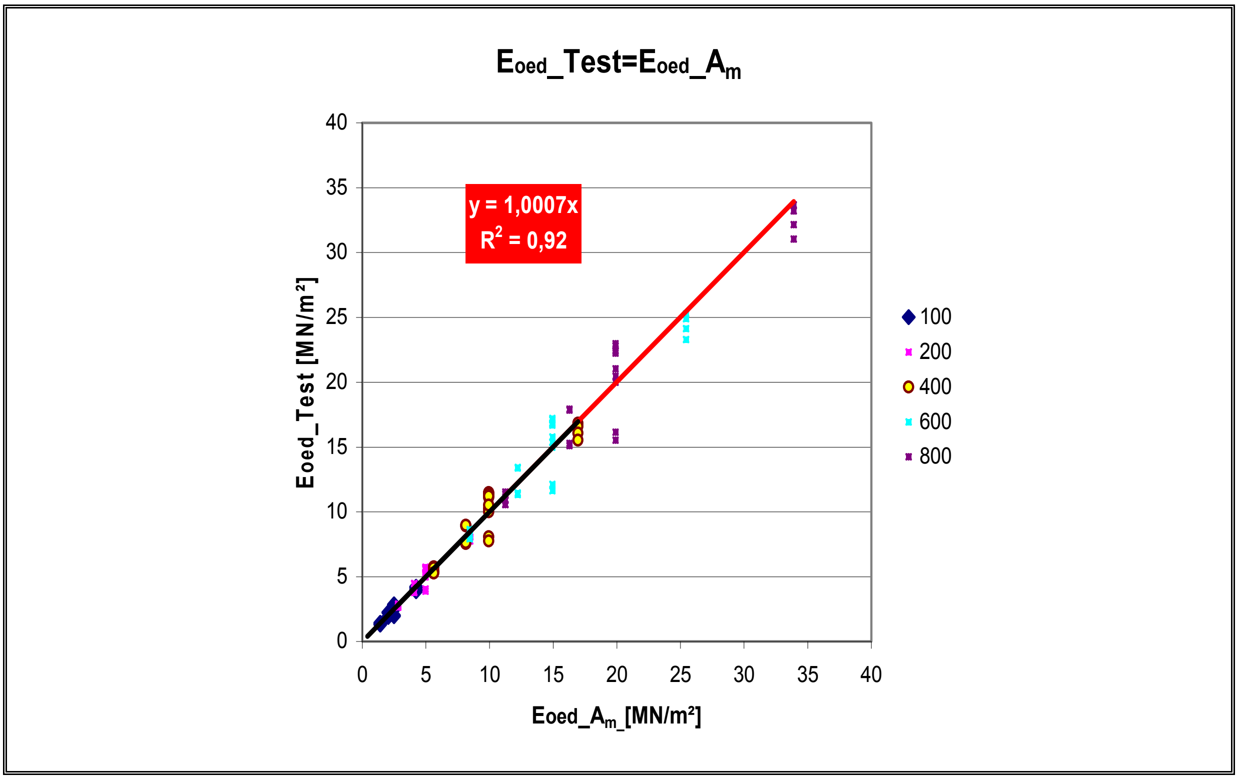
بتعويض العلاقة (٤-٣-٢٨) في العلاقة (٤-٣-٢٧) نحصل على العلاقة (٤-٣-٢٩) المطلوبة و التي تحسب لنا قيمة معامل التشوه كتابع للفعّالية المعدّلة والضغط الفعّال المطبق:

$$E_{oed}\ [MN/m^2] = 9,647 * \sigma' * A_m^{-0,4236}$$ (٤-٣-٢٩)

أو العلاقة ٤-٣-٣٠ عندما يؤخذ الضغط ب kN/m^2

$$E_{oed}\,[MN/m^2] = 0{,}0096 * \sigma' * A_m^{-0{,}4236} \qquad (٤\text{-}٣\text{-}٣٠)$$

☑ من أجل تقييم دقة العلاقة السابقة رسمت العلاقة بين قيم قرينة الإنضغاط الناتجة عن التجربة والمحسوبة من هذه العلاقة التجريبية بيانياً (الشكل ٤-٣-٣٤), فوجد أن معامل الإرتباط الخطي فيها يصل إلى ٩٢% , وهي دقة عالية نسبياً, أي يمكن القول أنه يمكن حساب قيمة معامل التشوه من العلاقة السابقة بدقة عالية كتابع للضغط الفعّال المطبق والفعّالية المعدّلة , وهي علاقة مميزة بالمقارنة مع العلاقة السابقة ٤-٣-٢٦ كونها تحسب معامل التشوه من خواص المادة دون إجراء تجربة الإنضغاطية.



الشكل (٤-٣-٣٤) العلاقة بين قيم معامل التشوه الناتجة عن التجربة و قيم معامل التشوه الناتجة عن تطبيق العلاقة (٤-٣-٣٠)

الفصل الخامس

نتائج البحث والتوصيات



٥- نتائج البحث والتوصيات

١. شملت الدراسة المرجعية مجموعة كبيرة من المراجع والأبحاث و الدراسات المتعلقة بموضوع الإنضغاطية في الأتربة الناعمة و العوامل المؤثرة عليها (بشكل عام) والعلاقات التجريبية المقترحة لتقدير قرينة الإنضغاط و معامل التشوه الخطي (بشكل خاص).

٢. وجدت أكثر من ١٠٠ علاقة تجريبية لحساب قرينة الإنضغاط , حيث وردت بعض هذه العلاقات في أكثر من مرجع مع إختلاف اسم العالم أو شروط التطبيق في بعض الأحيان.

٣. تختلف العلاقات المقترحة بشكل ملحوظ عن بعضها البعض بالقيم الناتجة عنها و بشكل العلاقة والمتحولات الداخلة فيها.

٤. إعتمدت أغلب هذه العلاقات على الخواص الأساسية للتربة مثل حدود آتربرغ , الرطوبة الطبيعية , معامل المسامية وغيرها بشكل أساسي لحساب قرينة الإنضغاط وبالتالي معامل التشوه الخطي.

٥. في أغلب المراجع لم ينوه أو يجرى أي تصحيح للأخطاء الممكنة والحاصلة والمتعلقة بالعينات وبالتجربة مثل تخرب العينات ,الجهاز المستخدم و طريقة تنفيذ التجربة ... الخ, والتي يمكن أن تكون ذات تأثير مهم على نتائج الدراسة الناتجة.

٦. أعتمد الكثير من الباحثين في دراستهم على نتائج تجارب سابقة دون بيان أو شرح واضح لنوع و لمواصفات الأتربة المستخدمة تصنيفها ونوع العينات المستخدمة و للتجربة وتقنيتها.

٧. هناك نقص واضح في المعلومات اللازمة في كثير من الأبحاث مثل نوع التربة ومواصفاتها ودرجة سلامة العينات وغير ذلك و أحيانا كثيرة في دقة العلاقة المذكورة.

٨. تم دراسة هذه العلاقات بشكل مفصل ودقيق ووجدنا أن التباين بين قيم قرينة الإنضغاط المحسوبة من العلاقات السابقة حتى المتماثلة منها من حيث شروط التطبيق , لابد أن يرجع إلى أسباب ومؤثرات أخرى غير نوع التربة أو درجة سلامة العينة المرفقة مع العلاقة, وأن تقدير قيمة قرينة الإنضغاط كتابع لمتحول واحد فقط مثل معامل المسامية الإبتدائي أو حد السيولة أو قرينة اللدونة أو أكثر (متحولين أو أكثر من هذه المتحولات) هو أمر غير مرض وغير كاف بشكل عام.

٩. اختلفت النتائج التجريبية عن نتائج العلاقات المعمول بها في المراجع , و يمكن أن يكون أحد أسباب هذا الإختلاف فيما بينها أيضاً هو الإختلاف بالشروط الإبتدائية للعينات وللتجارب.

١٠. عند البحث لإيجاد أفضل العلاقات لتقدير (حساب) قيم قرينة الإنضغاط تم التأكد من أن دقة العلاقة تتحسن عندما تتوحد الشروط الإبتدائية للتجربة أي عندما أعتمدت فقط التجارب ذات الرطوبة الإبتدائية المساوية لرطوبة حد سيولتها في دراسة العلاقة , حيث إرتفع معامل الإرتباط الخطي في جميع العلاقات المدروسة كما هو واضح في الجدول (٥-١).

١١. تم إيجاد عدة علاقات تجريبية جديدة لتعيين قرينة الإنضغاط كتابع لبعض العوامل الأساسية بدقة كافية مقبولة , يبين الجدول (٥-١) هذه العلاقات مع معامل الإرتباط المرافق .

ملاحظات	$R^2\%$	العلاقة	
لجميع التجارب	82	$C_c = 0,0734 * e^{1,932*w_0}$	١
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	93	$C_c = 0,0546 * e^{2,3885*w_0}$	
لجميع التجارب	83	$C_c= 0,2342 * e_0 – 0,0817$	٢
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	92	$C_c= 0,2787 * e_0 – 0, 1392$	
لجميع التجارب	92	$C_c =0,0702 * e_0^2 + 0,0769$	٣
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	98	$C_c = 0,0801 * e_0^2 + 0,0592$	
لجميع التجارب	80	$C_c= 0,5882 * w_L – 0,0274$	٤
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	86	$C_c = 0,6502 * w_L + 0,0709$	
لجميع التجارب	90	$C_c= 0,882 * I_P + 0,0414$	٥
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	94	$C_c = 0,927 * I_P + 0,022$	
لجميع التجارب	95	$C_c = 1,2783 * (I_P)^2 + 0,1381$	٦
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	97	$C_c = 1,3481 * (I_P)^2+ 0,1161$	

لجميع التجارب	81	$C_c = 0{,}0055 * Cl + 0{,}0852$	٧
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	86	$C_c = 0{,}0061 * Cl + 0{,}0455$	
لجميع التجارب	99,1	$C_c = 1{,}3589 * A_m + 0{,}055$	٨
لرطوبة إبتدائية تساوي رطوبة حد السيولة	99,89	$C_c = 1{,}352 * A_m + 0{,}0547$	

الجدول (٥-١) العلاقات المستنتجة في هذا البحث لحساب قرينة الإنضغاط كتابع إلى متغير واحد مع معامل الإرتباط الخطي الموافق لها

١٢. من أجل إدخال أكبر عدد ممكن من العوامل الأساسية في علاقة لتعيين قرينة الإنضغاط و بدقة كافية تم إيجاد علاقتين بدقة ممتازة نسبيا تمكننا من تقدير قرينة الإنضغاط من مجموعة من التجارب البسيطة بالمقارنة مع تجربة الإنضغاطية (الجدول ٥-٢).

العلاقة	R^2 %
$C_c = (0{,}2204 * \frac{w_0}{w_L} + 1{,}1295) * I_P{}^2 + (0{,}0285 * \frac{w_0}{w_L} + 0{,}0782)$	96,95
$C_c = (0{,}2242 * \frac{w_0}{w_L} + 1{,}1352) * A_m + (0{,}0187 * \frac{w_0}{w_L} + 0{,}0298)$	99,6

الجدول (٥-٢) العلاقات المستنتجة في هذا البحث لحساب قرينة الإنضغاط كتابع إلى أكثر من متغير مع معامل الإرتباط الخطي الموافق لها

١٣. تزداد قيمة معامل التشوه الخطي بزيادة الرطوبة الإبتدائية للعينة.

١٤. تم إيجاد علاقة تجريبية ذات دقة عالية تربط معامل التشوه الخطي بقرينة الإنضغاط (الجدول ٥-٣) و هي توافق العلاقة الواردة سابقا في المراجع , وهي علاقة تتعلق من حيث الدقة أيضا بدقة تعيين قرينة الإنضغاط (يؤخذ الضغط ب kN/m^2).

العلاقة	R^2 %
$E_{oed}[MN/m^2] = (0{,}0023 * \sigma') * ((1+e_0)/C_c)$	99,8

الجدول (٥-٣) العلاقة المستنتجة في هذا العمل لحساب معامل التشوه مع معامل الإرتباط الخطي الموافق لها

١٥. تم ايجاد علاقة تجريبية جديدة (الجدول ٥-٤) لتعيين معامل التشوه كتابع لبعض العوامل الأساسية بدقة كافية (يؤخذ الضغط ب kN/m^2)

العلاقة	R^2 %
$E_{oed}[MN/m^2] = 0,0096 * \sigma' * A_m^{-0,4236}$	92

الجدول (٥-٤) العلاقة المستنتجة في هذا العمل لحساب معامل التشوه مع معامل الإرتباط الخطي الموافق لها

٥-١ شروط تطبيق هذه العلاقات

تطبق العلاقات المذكورة وفقا للشروط التالية:

١. على الأتربة الناعمة المشبعة بالماء والمشكلة مخبريا بشروط الإنضغاط الطبيعي , ويمكن حسب ترزاكي وبيك ضرب قرينة الإنضغاط المحسوبة للأتربة المشكلة مخبرياً ب (1,3) للحصول على قيمة قرينة الإنضغاط للأتربة الطبيعية سليمة البنية .
٢. على الأتربة غير العضوية (المواد العضوية أقل من 5%).
٣. على الأتربة ذات حد سيولة أقل من % 100.
٤. ضمن مجال للاجهادات لايزيد عن 2000 kN/m^2 المستخدمة في هذا البحث.
٥. من أجل فعّالية معدّلة لاتزيد قيمتها عن 0,42 (المجال المستخدم في البحث).

٥-٢ التوصيات

١. ينصح بإجراء نفس التجارب على عينات سليمة البنية
٢. ينصح بإجراء تجارب متممة خارج المجالات المطبقة في هذا البحث (خواص المادة مثلا)
٣. إيجاد تأثير الإجهادات المسبقة و درجة الإنضغاط المسبق من خلال بحث منفصل

تم بعون الله تعالى

Example of Consolidation Test

Project: Master work Dipl.Eng. Maha Alkhaddour

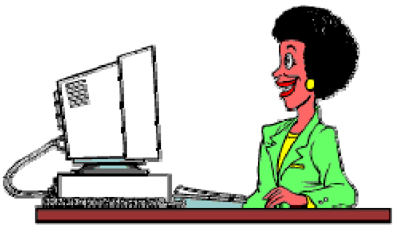
sample No.:IV_1-4

Specimen	
area A [cm^2]	19,6350
initial thickness h_0 [mm]	19,8000
wet mass m [g]	75,1300
initial moisture w_0	0,3670
mass of solid m_s [g]	54,9598

Soil specimen property			
specific density ρ_S [g/cm^3]	2,6800	w_L	0,2912
dry density ρ_d [g/cm^3]	1,4137	w_p	0,2092
wet density ρ [g/cm^3]	1,9325	I_p	0,082
intial void ratio e_0	0,8958	activity A	0,57143
		A_m	1,03002

test points	effective vertical pessure	change of effective vertical pressure	reading	settlement	relative vertical strain	change of relative vertical strain	change of void ratio to initial e_0	modul of compressibility	void ratio
	σ'	$\Delta\sigma'$	r'	$\Delta h = r' - r_0$	$\varepsilon = \Delta h / h_0$	$\Delta\varepsilon$	$\Delta e = \varepsilon * (1+e_0)$	$E_{oed} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$	$e = e_0 - \Delta e$
	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[MN/m^2]	[-]
0	0,0	0,0	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,8958
1	1,0	1,0	0,141	0,141	0,0071	0,0071	0,0135	0,14	0,8823
2	2,0	1,0	0,381	0,381	0,0192	0,0121	0,0365	0,08	0,8593
3	5,0	3,0	0,722	0,722	0,0365	0,0172	0,0691	0,17	0,8266
4	10,0	5,0	1,320	1,320	0,0667	0,0302	0,1264	0,17	0,7694
5	40,0	30,0	2,261	2,261	0,1142	0,0475	0,2165	0,63	0,6793
6	200,0	160,0	3,056	3,056	0,1543	0,0402	0,2926	3,98	0,6032
7	400,0	200,0	3,399	3,399	0,1717	0,0173	0,3254	11,55	0,5703
8	600,0	200,0	3,599	3,599	0,1818	0,0101	0,3446	19,80	0,5512
9	400,0	-200,0	3,588	3,588	0,1812	-0,0006	0,3435	360,00	0,5522
10	600,0	200,0	3,610	3,610	0,1823	0,0011	0,3456	180,00	0,5501
11	800,0	200,0	3,753	3,753	0,1895	0,0072	0,3593	27,69	0,5364
12	1500,0	700,0	4,065	4,065	0,2053	0,0158	0,3892	44,42	0,5066

المراجع





المراجع

1 BRAJA M. DAS : Advanced Soil Mechanics, Third edition , Taylor & Francis London and New York , 2008

2 AL-KAFAJI, AMIR: Empirical Compression Index Equations, Intenational Workshop on Innovations in Material and Design of Civil Infrastructure Cairo – Egypt, DEC 2005

3 M. AYSEN LAV, ATILLA M. ANSAL : Regression Analysis of Soil Compressibility , Turk J Engin Environ Sci 25 (2001) , page 101 – 109, 2001

4 V. N. S. MURTHY : Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Marcel Dekker Inc. New York, California State University, Sacramento – THOMSON , DEC 2009

5 BRAJA M. DAS : Principles of Geotechnical Engineering, Fifth edition , Nelson, a division of Thomson Canada Limited, 2005

6 TATSUYA KOUMOTO and ZASUTAKA OTSUKA : On the Compression Characteristics of undisturbed Ariake clay, Faculity of agrecalture, Saga University, 72 – page 127 - 132, 1991

7 JAVED ,SAYEED: Prediction of Compression and Recompression Indicated of Texsas Overconsolidated Clays,

8 Baugrundverformung TUM zentrum , zentrum Geotechnik Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, 2005

9 MORRIS ,PETER and LOCKINGTON ,DAVID: Geotechnical Compressibility and correlation for remoulded fine-grained Marine and Riverine sediments , Sustainable Tourism Pty Ltd, 2002

10 MARDINI, GHIAS : Lectures in soil mechanics, AIU, 2009-2010

11 AMIT NATH and S.S. DEEALAL : The Role of Plasticity Index in Predicting Compression Behaviour of Clay, Research Officers, River Research Institute, P.O. Mohonpur, Dist.-Nadia, India, 2004

12 TIMBUNAN JALAN PADA TANAH LUNAK : Panduan Geoteknik Indonesia , Edisi Pertama Bahasa Indonesia ,Desain dan Konstruksi, Panduan Geoteknik 4, , Pusat Litbang Prasarana Transportasi, NOV 2001

13 http://www.finesoftware.eu/ Fine Ltd. , 2007

14 KEMPFERT , HANS - GEORG and BERHANE GEBRESELASSIE : Excavations and foundations in Soils, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Printed in The Netherlands, 2006

15 HOLTZ ,ROBERT and KOVCS ,WILLIAM: An Introduction to Geotechnical Engineering , By prentice Hall, Englewood Cliffes, New Jersey 07632, 1981

16 ALAN R. CRUMLEY , AME`RICO L. FERNA`NDEZ and CARLOS A. REGALADO :Compressibility Relationships for Soils in Puerto Rico , presented at Soil and Rock America 12th Panamerican Conference on Soil mechanics and Geotechnical Engineering , Cambridge, Massachusetts, june 2003

17 ANH – MINH TANG , YU-JUN CUI , JAVED ESLAMI and PAULINE DE`FOSSEY : Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils , Ecole des Ponts – ParisTech , U.R. Navier/CERMES, 6-8 av. Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Marne –la–Vallée ,FRANCE , 2007

18 K. MALLIKARJUNA RAO and SUBBA REDDY and CH. SUDHA RANI : Appropriate Parameters for Prediction of Compression Index, Department of Computer Science & Engineering, Sri Venkateswara University, Tirupati

19 حنّا ينّي : ميكانيك التربة (1, 2), منشورات جامعة دمشق ,1995-1996 and 1977-1978

20 Bodenmechanisches Labor Anweisung zur Versuchdurchfürung ,Technische Universität Dresden 2007

21 MARDINI, GHIAS: Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Scherfestigkeit feinkörniger Wassergesättigter Lockergestein in einem Kreisringschergerät , Dissertation , TU Bergakademie Freiberg, 1989

22 BLOOMQUIYST, D.: Consolidation and Settlement in Clay

23 AYSEN ,A : Problem Solving in Soil mechanics , published by A. A. Balkema publishers, a member of Swets and Zeitlinger publishers, 2003

24 WHITLOW ,ROY : Basic Soil Mechanics (Fourth edition) , By Pearson Education Limited, Prentice Hall, England , 2001

25 BRAJA M. DAS: Soil mechanics Laboratory manual (Sixth edition) , Published by Oxford University Press, Inc. 198 Madison Avenue, New York, New York 10016, 2002

26 Bodenmechanisches Labor Anweisung zur Versuchsdurchführung , TU Dresden, 2007

27 Bodenmechanisches Labor Anweisung zur Versuchsdurchführung , TU Dresden, 2005

28 (DIN 18 124) Bestimmung der Korndichte Kapillarpyknometer – Weithalspyknometer , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin, 1997

29 (DIN 18 123) Bestimmung der Korngrößverteilung , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin, 1996

30 (DIN 18 122 T1)Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) Bestimmung der Fließ - und Ausrollgrenze nach Casagrande , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin,1997

31 (DIN ISO/TS 17892-12) Bestimmung der Zustandsgrenzen Fallkegelmethode , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin , 2004

32 (DIN 18 128) Bestimmung des Glühverlustes , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin , 2002

33 (DIN 18 135) Eindimentionaler Kompressionsversuch , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin, 1999

34 (DIN 18 196) Erd- und Grundbau –Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin ,2006

35 LANG , HANS – JÜRGEN and HUDER, JACHEN : Bodenmechanik und Grundbau , Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985

36 SCHMIDT, HANS – HENNING : Grundlagen der Geotechnik , B.G. Teubner Stuttgart, 1996

37 GUDEHUS ,GERD: Bodenmechanik , Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1981

38 RODATZ , WALTER: Vorlesungsumdruck Grundbau Bodenmechanik Unterirdisches Bauen (4 - 5 Semesters) , Institut für Grundbau und Bodenmechanik, 1992

39 RODATZ , WALTER: Vorlesungsumdruck Grundbau und Bodenmechanik IV (7 - 8 Semesters) , Institut für Grundbau und Bodenmechanik ,1990

40 BOND, ANDREW and HARRIS, ANDREW: Decoding Eurocode 7 , Taylor & Francis London and New York , published in the Taylor & Francis e-Library, 2008

41 Engineering Properties of Soil and Rock – chapter 3, TM 5-818-1/AFM 88-3, Chap. 7

42 Engineer Manual Laboratory Soils Testing Headquarters , department of the army, Office of the chief of engineers , 1986

43 Soil Mechanics Laboratory Manual , BS 1377 Part 5 , Geotechnical Laboratory of DGM, Thimphu Bhutan , 1990

44 BALAUBRAMANIAM and BRENNER : Consolidation and settlement of the soft clay , DEPARTMENT OF THE ARMY U. S. Army Corps of Engineers Washington, D. C. 20314-1000,1981

45 (DIN 18 121 T1) Wassergehalt : Bestimmung durch Ofentrocknung , DIN Deutsches Institut für Norming, Berlin ,1998

46 DÖRKEN & DEHNE: Grundbau in Beispielen, Teil 2, Werner-Verlag GmbH. Düsseldorf – Germany, 1995

47 Bühl Achim & Zöfel Peter, SPSS 11: Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows , 8. überarbeitete Auflage, Pearson Studium, München 2002

Damascus university
Civil engineering faculty
Department of geotechnical engineering

„Effect of liquid limit, plastic limit, activity and modified activity in fine grained soils on compression index and modulus of linear deformation extracted from Oedometer test „

This research is done in fulfilment of the requirements of a master degree in geotechnical engineering

Presented by:
Dipl.-Eng. Maha Alkhaddour

Supervisor:
Prof. Dr . Eng. Hanna Yanni

Co-supervisor:
Dr. Eng. Talal Awwad

2009-2010

Summary

This research deals with the influence of fine-grained soil properties (especially the liquid limit and the plastic limit and the activity and the modified activity) on the compression index and the modulus of linear deformation (determineded depend on Oedometer tests). The research consists of two parts, the first one is the theoretical study, which included many literatures and researches and studies and papers which have dealt with the topic of this research (the consolidation of fine-grained soils and the factors influencing it (in general) and the empirical proposed equations in the literature which determine (calculate) the compression index and the modulus of linear deformation (especially)), it were found more than 100 proposed empirical equations to determine the compression index. These equations were varying considerably from each other (in the form, in the values, in the resulting accuracy and of variables involved). These equations have been studied extensively and accurately. It was found that the differences between the values of the calculated compression index (also for the similar conditions of the application), They have other reasons and effects (not only the soil type or degree of sample disturbance) and the estimate of the compression index value as a function of only one variable or more variables that have been mentioned in various literatures (such as the initial void ratio or the liquid limit or the plasticity index), is unsatisfactory and not enough. The second part included the empirical studies, that four fine-grained soils were selected, which have different properties. The basic properties tests and consolidation test were done for these soils, and then the results were treated and evaluated. These results were compared with the results of previous studies and evaluated. New empirical equations were found to calculate the compression index and the modulus of linear deformation. This was the result of study and application of new parameters (variables) that have been studied in the literatures and not yet used (as the ratio of fine-grained materials, the activity and the modified activity)). At the end new experimental equations (with high statistical accuracy) have been found that can help us to calculate the compression index and the modulus of linear deformation. This can be done by performing simple basic tests (compared with the consolidation test).